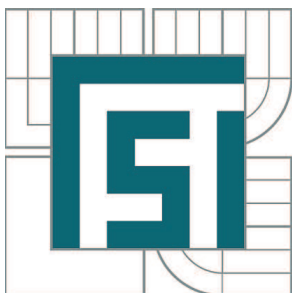


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

VYUŽITÍ ODPADNÍCH ROSTLINNÝCH OLEJŮ JAKO ALTERNATIVNÍHO PALIVA PRO VZNĚTOVÉ SPALOVACÍ MOTORY

UTILIZATION OF WASTE VEGETABLE OILS AS AN ALTERNATIVE FUEL FOR DIESEL
COMBUSTION ENGINES

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. LUKÁŠ MICHNA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. JIŘÍ STODOLA, DrSc.

BRNO 2012

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automobilního a dopravního inženýrství

Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Lukáš Michna

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Automobilní a dopravní inženýrství (2301T038)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Využití odpadních rostlinných olejů jako alternativního paliva pro vznětové spalovací motory

v anglickém jazyce:

Utilization of Waste Vegetable Oils as an Alternative Fuel for Diesel Combustion Engines

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Pojednat o energetické, ekonomické a ekologické bilanci výroby, distribuci a využití motorové nafty, směsné motorové nafty, bionafty a jejich možné náhradě rostlinnými oleji.

Realizovat laboratorní porovnání vybraných parametrů jednotlivých paliv dle ČSN EN 590: složení (hustota při 15°C, obsah síry, polyaromatických uhlovodíků,...), viskozita, mazivost, korozní působení, obsah nečistot, vody, bod vzplanutí, výhřevnost, pěnivost, aj. Navrhnout úpravy rostlinného oleje filtrací, ohřevem a přidavkem na trhu dostupných aditiv, laboratorně ověřit změny vlastností, možnosti získání vlastností blížících se vlastnostem motorové nafty (ČSN EN 590).

Cíle diplomové práce:

- 1) Pojednat o energetické, ekonomické a ekologické bilanci výroby, distribuci a využití paliv.
- 2) Realizovat laboratorní porovnání vybraných parametrů jednotlivých paliv.
- 3) Navrhnout úpravy rostlinného oleje .
- 4) Formulovat závěry pro praxi.

Seznam odborné literatury:

- [1] HLAVENKA, T. VOJTÍŠEK, M. ČUPERA, J. FAJMAN, M. Výkonové a emisní parametry moderních vznětových motorů dlouhodobě provozovaných na rostlinný olej. [CD-ROM]. In Advances in Automotive Engineering Volume III. s. 67--83. ISBN 978-80-552-0257-0.
- [2] HLAVENKA, T. SVOBODA, J. FAJMAN, M. VYUŽITÍ ROSTLINNÝCH OLEJŮ JAKO PALIVA A VLIV JEJICH POUŽITÍ NA EMISE VÝFUKOVÝCH PLYNŮ. [CD-ROM]. In MendelNet'06 Agro - Proceedings of International Ph.D. Students Conference. ISBN 80-7157-999-8.
- [3] STODOLA, J. MACHALÍKOVÁ, J. Spolehlivost a diagnostika. Část: Provozní hmoty a materiály pro MVT. UO v Brně, 2006. Skripta S -3683. ISBN 80-7231-167-0
- [4] MATĚJOVSKÝ, V. Automobilová paliva. GRADA, 2005. ISBN 80-247-0350-5
- [5] □ Normy ČSN EN ISO týkající se ropných výrobků zahrnující paliva a maziva

Vedoucí diplomové práce: prof. Ing. Jiří Stodola, DrSc.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/2012.

V Brně, dne 8.11.2011

L.S.

prof. Ing. Václav Pištěk, DrSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty



ABSTRAKT

Tato práce v úvodu přináší stručný souhrn energetických, ekologických a ekonomických bilancí souvisejících s výrobou a využitím konvenčních paliv pro vznětové motory a nabízí porovnání s možností pohonu těchto motorů recyklovanými rostlinnými oleji coby odpadního produktu z potravinářské výroby.

Stěžejní část je zaměřena na laboratorní analýzu významných fyzikálních a chemických vlastností tohoto alternativního paliva a jejich porovnání s vlastností motorové nafty, zejména dle normy ČSN EN 590. V závěru je navržena úprava vozidla se vznětovým motorem k pohonu odpadními rostlinnými oleji.

KLÍČOVÁ SLOVA

rostlinný olej, fritovací olej, odpad, recyklace, biopalivo, vznětový motor

ABSTRACT

In the introduction this thesis brings a short summary of the energy, environmental and economical balance, related to the production and use of conventional fuels for diesel engines, and compares them with possibility of using recycled cooking vegetable oils as a fuel.

The main part focuses on the laboratory analysis of major physical and chemical properties of this alternative fuel and on their comparison to diesel fuel, especially according to ČSN EN 590 norm. In conclusion there is a proposal of diesel vehicle modification to be propelled with waste vegetable oils.

KEYWORDS

vegetable oil, cooking oil, waste, recycling, biodiesel, diesel engine



BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MICHNA, L. *Využití odpadních rostlinných olejů jako alternativního paliva pro vznětové spalovací motory*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 65 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Jiří Stodola, DrSc.



ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením prof. Ing. Jiřího Stodoly, DrSc. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 24. května 2012

.....

Bc. Lukáš Michna



PODĚKOVÁNÍ

Děkuji prof. Ing. Jiřímu Stodolovi, DrSc. za obětavé vedení této práce a za zajištění podmínek k její realizaci.

Děkuji pplk. doc. Ing. Štefanu Čornákovi, Dr., kpt. Ing. Josefu Glosovi, doc. Ing. Ivanu Mazůrkovi, CSc. a Ing. Jakubu Roupcovi, Ph.D. za odborný dozor při laboratorních analýzách.

Děkuji své rodině, přítelkyni a všem blízkým, kteří při mně stojí a podporují mne v mých rozhodnutích.

A děkuji všem těm, kteří ví, že jim mé díky patří.

Děkuji.



OBSAH

Úvod	10
1 Porovnání nafty, bionafty a rostlinného oleje.....	11
1.1 Fosilní paliva.....	11
1.2 Biopaliva	11
1.3 Odpadní rostlinný olej	13
2 Odpadní rostlinný olej jako palivo	14
3 Úprava odpadního rostlinného oleje.....	15
3.1 Filtrace	15
3.1.1 Návrh vícestupňového filtračního zařízení.....	16
3.1.2 Analýza porovnávacích vzorků	18
3.1.3 Zhodnocení výsledků.....	19
3.2 Další úpravy	20
4 Laboratorní analýza odpadního rostlinného oleje jako paliva.....	21
4.1 Hustota	21
4.1.1 Způsob měření	21
4.1.2 Postup výpočtu	22
4.1.3 Zhodnocení výsledků.....	24
4.2 Viskozita	25
4.2.1 Způsob měření	25
4.2.2 Postup výpočtu	26
4.2.3 Zhodnocení výsledků.....	27
4.3 Mazivost.....	28
4.3.1 Způsob měření	28
4.3.2 Postup výpočtu	29
4.3.3 Zhodnocení výsledků.....	31
4.4 Obsah vody	31
4.4.1 Způsob měření	31
4.4.2 Zhodnocení výsledků.....	32
4.5 Bod vzplanutí.....	32
4.5.1 Způsob měření	33
4.5.2 Zhodnocení výsledků.....	33
4.6 Polycyklické aromatické uhlovodíky.....	34
4.6.1 Způsob měření	34
4.6.2 Zhodnocení výsledků.....	35
4.7 Obsah fosforu.....	35



4.7.1	Způsob měření	35
4.7.2	Zhodnocení výsledků.....	35
4.8	Kovy II. skupiny	36
4.8.1	Zhodnocení výsledků.....	36
4.9	Pěnivost.....	36
4.9.1	Způsob měření	37
4.9.2	Průběh zkoušky	37
4.9.3	Zhodnocení výsledků.....	42
4.10	Výhřevnost	42
4.10.1	Způsob měření	43
4.10.2	Zhodnocení výsledků.....	44
5	Konverze vozidla na bivalentní palivový systém	45
5.1	Ohřev rostlinného oleje.....	45
5.1.1	Ohřev odpadním teplem motoru:.....	45
5.1.2	Ohřev elektrickou energií:	47
5.2	Realizace konverze vozidla na bivalentní palivový systém.....	49
5.3	Režimy dvounádržového palivového systému	55
5.3.1	Režim „nafta“:	56
5.3.2	Režim „olej do 50 °C“ – fáze 1:	57
5.3.3	Režim „olej do 50 °C“ – fáze 2:	58
5.3.4	Režim „olej do 70 °C“:.....	59
5.3.5	Režim „olej nad 70 °C“:	60
5.3.6	Režim „proplach“:	61
	Závěr.....	62
	Seznam použitých zkratek a symbolů	65



ÚVOD

Dnešní vznětové motory jsou stále v drtivé většině provozovány na motorovou naftu, která má původ ve fosilních zdrojích energie. Omezené zdroje ropy však již řadu let vyvolávají mezi populací značný neklid, který je navíc podporován neustálým růstem cen fosilních paliv, mimo jiné způsobeným značnou politickou nestabilitou ve Světě. Trendem dnešní doby je snaha o nahrazení těchto zdrojů jinými, zejména pak palivovými články či elektrickou energií. Problémy s ukládáním takové formy energie však vylučují, že by v nejbližších letech měly být spalovací motory čímkoli nahrazeny. Je tedy zřejmé, že ideálním východiskem by bylo objevit či vyvinout takový zdroj energie pro spalovací motory, který by posloužil jako ekvivalentní náhrada fosilních paliv. Způsob získávání takových paliv z biologicky obnovitelných zdrojů je sice čím dál efektnější, je však limitován maximální kapacitou jejich produkce. Velmi zajímavou se tak stává možnost získávat palivo recyklací odpadu. Takovou možnost nabízí rostlinný olej jako odpadní produkt z potravinářské výroby, jelikož produkované množství je úměrné množství produkovaných potravin.

Tato práce si dává za cíl analyzovat vybrané fyzikální a chemické vlastnosti takového oleje, dosažené výsledky porovnat s parametry motorové nafty, zejména dle normy ČSN EN 590, a případně navrhnout vhodnou úpravu k dosažení požadovaných vlastností. Takto upravené palivo bude následně testováno ve vozidle se vznětovým spalovacím motorem.



1 POROVNÁNÍ NAFTY, BIONAFTY A ROSTLINNÉHO OLEJE

V dnešní době již lze konstatovat, že energie z obnovitelných zdrojů začíná postupně nahrazovat energii z fosilních paliv. Pádných důvodů je hned několik, ty hlavní spadají do ekologické a ekonomické (nebo spíše politické) sféry. Zásoby fosilních paliv jsou omezené a není možné je obnovit, jelikož jejich tvorba trvá neúměrně déle než jejich následné využití (např. několik milionů let proti několika stoletím). Obrovský vliv má také závislost zemí, které fosilní paliva kupují, na ekonomikách zemí, které je dodávají. Tyto vazby představují potenciální riziko, jelikož jejich stabilitu velmi dynamicky ovlivňuje politická a ekonomická situace ve Světě. Z ekologického hlediska je pádným argumentem nadměrná tvorba skleníkových plynů, které vznikají spalováním fosilních paliv.

1.1 FOSILNÍ PALIVA

Dnešní civilizace je životně závislá na použití spalovacích motorů. Nejde přitom jen o jejich přímé používání, na těchto tepelných strojích jsou totiž závislá veškerá průmyslová odvětví. Mezi jejich hlavní výhody patří relativně vysoká účinnost, spolehlivost, a nízké pořizovací i provozní náklady. Motory jsou poháněny téměř výhradně kapalnými palivy vyrobenými z ropy, tj. fosilního původu, jejichž spotřeba neustále narůstá (v ČR se v roce 2008 prodalo přibližně 2 mil. tun benzínu a 4 mil. tun nafty) [14]. Díky omezeným zásobám ropy a nemožnosti ji produkovat její cena neustále roste. Spalováním fosilních paliv se navíc do ovzduší uvolňuje velké množství škodlivin, kromě skleníkových plynů (zejména CO_2 , C_2O a případně metan) jsou to dále uhlovodíky HC, oxid uhelnatý CO, oxidy dusíku NO_x a pevné částice PM. Výroba paliv z fosilních zdrojů je navíc velmi energeticky náročná, například u ropné motorové nafty tvoří poměr energie dodané ku získané 6,0 GJ/GJ [15], tedy k získání 1 GJ energie musíme 6 GJ dodat.

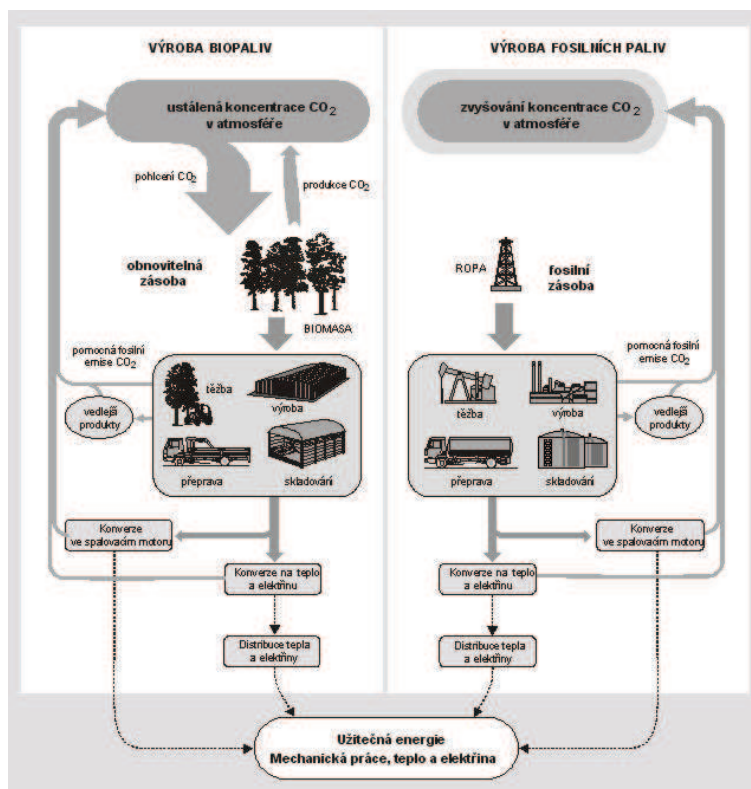
1.2 BIOPALIVA

Významnou alternativou, která v posledních letech zaznamenává značný růst, je náhrada fosilních paliv těmi z energeticky obnovitelných zdrojů, tzv. biopalivy. Pro vznětové spalovací motory mají největší význam biopaliva vyrobená z olejnatých plodin, z nichž se získává rostlinný olej. Těmi jsou zejména palma olejná, sója, řepka olejná, slunečnice, bavlník, podzemnice olejná, len, kukuřice, kokos či jojoba. Přes 80 % světové produkce rostlinných olejů je tvořeno čtyřmi oleji: palmovým, sójovým, řepkovým a slunečnicovým. Nejrozšířenější jsou olej palmový a sójový, každý z nich se podílí na celkové světové produkci rostlinných olejů zhruba 30 %. Produkce jednotlivých rostlinných olejů je vázána na specifické klimatické podmínky [16]. V klimatických podmínkách ČR je z těchto plodin nejvýhodnější pěstovat řepku olejnou. Rostlinné oleje však mají výrazně odlišné vlastnosti od motorové nafty a mají-li být použity k pohonu vznětových motorů, je nutné buď

- rostlinný olej upravit transesterifikací na tzv. bionaftu, která je již vhodná k přímému spalování v motoru, nebo
- upravit vznětový motor, zejména jeho palivový systém, ke spalování rostlinného oleje.



Biopaliva přináší řadu výhod. Z ekologického hlediska je to především jejich biologická odbouratelnost a netoxičnost, a dále pak pozitivní vliv na množství skleníkových plynů, jelikož produkce oxidu uhličitého při jejich spalování je kompenzována jeho spotřebou při fotosyntéze probíhající v rostlinách, ze kterých se tato biopaliva vyrábí [16]. Porovnání koloběhu CO_2 při použití fosilních paliv a biopaliv je znázorněno na Obr. 1.



Obr. 1 Porovnání fosilních paliv a biopaliv z hlediska koloběhu CO_2 [17]

Z energetického hlediska jsou biopaliva také velmi výhodná, např. k výrobě bionafty z řepky olejné v našich podmínkách je poměr dodané energie ku získané 0,34 GJ/GJ [18]. K velmi výhodnému poměru energií přispívá také to, že odpadní produkty při výrobě bionafty jsou dále zužitkovány.

Ekonomická bilance však již tolik příznivá není. Problém spočívá hlavně v omezeném množství zemědělských ploch k pěstování olejnatých plodin pro výrobu biopaliv, a dále také v tom, že i přes zajímavou energetickou bilanci při jejich výrobě je vložená energie poměrně drahá, na rozdíl od fosilních paliv. Zásoby ropy jsou totiž uloženy pod zemským povrchem, tedy v místech, která nelze jinak zužítovat, a navíc energii v ní uloženou není třeba nijak „vyrábět“, obhospodařovat. Fosilní paliva jsou tedy i přes značně nevýhodnou energetickou bilanci při jejich výrobě ekonomicky výhodnější, jelikož o uložení energie se již postarala příroda v průběhu milionů let. Tato skutečnost činí výrobu biopaliv vůči fosilním natolik ekonomicky nevýhodnou, že za srovnatelných podmínek nemají šanci na trhu obstát. Proto jsou biopaliva cenově zvýhodňována, a to především úlevou od spotřební daně. Ekonomická kompenzace využití biopaliv se řídí směrnicí 2003/96/ES a v souladu s ní je i náš zákon č.



353/2003 Sb. o spotřebních daních. Pro bionaftu činí daňová úleva 9,95 Kč/l, zákon stanoví navíc i dotaci pro dopravní účely [19].

1.3 ODPADNÍ ROSTLINNÝ OLEJ

Odpadní (nebo také recyklovaný) rostlinný olej je zbytkový produkt z potravinářské výroby. Získává se podobným způsobem jako rostlinný olej určený pro spalovací motory, tedy lisováním zastudena nebo zatepla z olejnatých plodin, u nás zejména z řepky olejné či slunečnice. Oproti těmto surovinám má však velkou výhodu, a sice že náklady na jeho výrobu jsou pokryty využitím právě k výrobě potravin. Jedná se tedy o velmi levný zdroj energie. Legislativa ukládá právnickým osobám provozujícím živnost v potravinářské výrobě nakládat s tímto olejem jako s nebezpečným odpadem, který musí být ekologicky likvidován. O to se starají společnosti, které tuto surovinu vykupují v cenách, které se dnes pohybují od 3 do 8 Kč/kg, a dále ji postupují k výrobě bionafty. Odborníci o tomto oleji hovoří jako o nejekologičtější surovině k výrobě bionafty [20]. Značnou produkci odpadního rostlinného oleje však mají na svědomí také domácnosti, které však nejsou nijak motivovány k odevzdávání této suroviny k dalšímu zpracování, a tak obvykle končí v nejlepším případě v komunálním odpadu. Studie přitom odhadují, že průměrné množství v domácnostech vyprodukovaného odpadního oleje je v USA a Kanadě 9 kg/1 obyvatele a rok, v zemích Evropské unie má celkové množství odpovídat 700 000 až 1 000 000 tun/rok, jen ve Velké Británii je toto množství větší než 200 000 tun/rok [21].

Energetická bilance výroby bionafty je v tomto případě ještě daleko příznivější než u nového rostlinného oleje, jelikož k získání 1 GJ energie je třeba dodat pouhých 0,083 GJ [18]. To samozřejmě platí, nejsou-li zahrnuty náklady na výrobu samotného oleje, které se přelévají do jiného průmyslového odvětví.

Další možností využití je ovšem samozřejmě spalování oleje v motorech k tomu přizpůsobených. Tím odpadají náklady na proces transesterifikace a zbývají pouze náklady spojené s distribucí, čištěním a případným odvodněním paliva. Tím energetické výdaje klesají asi na 2% energetického výnosu, a tedy k získání 1 GJ energie musíme vložit 0,02 GJ [22]. Další velikou výhodou je možnost decentralizace takové výroby, tedy možnost přenést výrobu paliva například přímo do areálu zemědělské výroby, kde by takové palivo mohlo pohánět zemědělské stroje, či rovnou do domácností. Při použití tohoto paliva je však nutné počítat s jednorázovou investicí do úpravy vznětového motoru ke spalování rostlinných olejů. Tyto konverzní sady se již dnes na trhu vyskytují a jejich ceny se pohybují v rozsahu 5 000 – 40 000 Kč, přičemž obecně platí, že čím modernější motor, tím dražší úprava.



2 ODPADNÍ ROSTLINNÝ OLEJ JAKO PALIVO

Pro potřeby realizace zkoušek v rámci rozsahu této práce bylo použito palivo, které bylo připraveno z odpadního rostlinného oleje získaného svozem z restaurací, jídelen, rychlých občerstvení, cateringových přípraven a domácností, a to po dobu jednoho roku. Konkrétní původ či složení jednotlivých příspěvků nebyly zjišťovány, jelikož tento princip přesně odpovídá praxi. K důkladnějším analýzám olejů jednotlivých výrobců či složení by byla nezbytně nutná úzká spolupráce dodavatelů odpadního oleje, toho však prakticky nelze docílit ani nad rozsah této práce. Dodavatelé by totiž museli být k takovým úkonům dostatečně motivováni, což by se jistě odrazilo ve výkupní ceně. Tím by se v krajní situaci mohla tato surovina stát ekonomicky nevýhodnou. Jedinou podmínkou tedy bylo, že surovina nesmí obsahovat jiné příměsi, jako například vodu, saponáty, komunální odpad apod.



Obr. 2 Odpadní rostlinný olej 1[23]

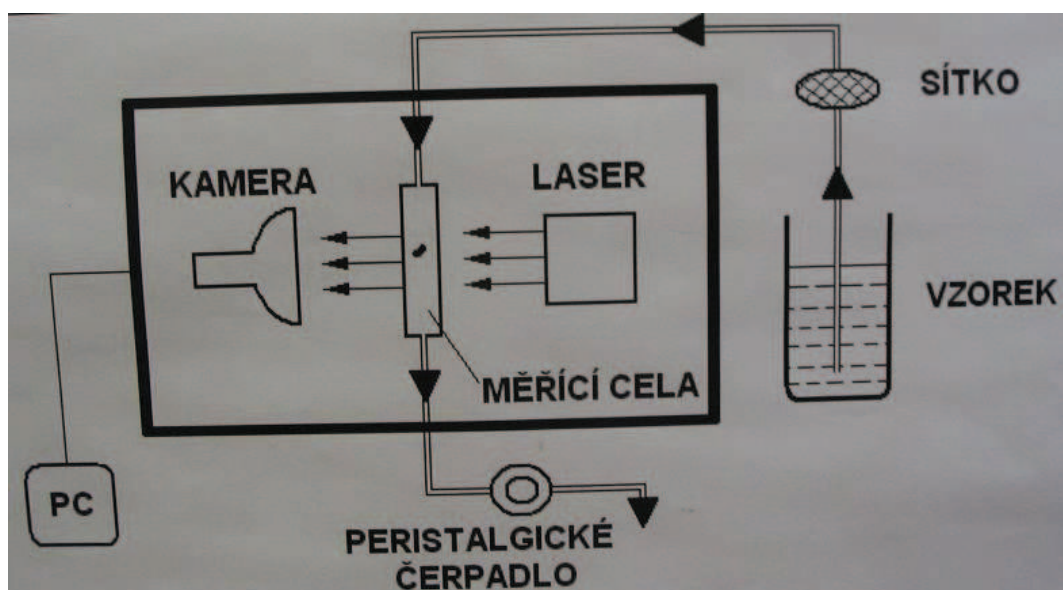


3 ÚPRAVA ODPADNÍHO ROSTLINNÉHO OLEJE

Aby mohl být olej použit jako palivo ve vznětovém motoru, je třeba jej nejdříve upravit, aby bylo dosaženo požadovaných vlastností. Vzhledem k původu takový olej obsahuje velmi vysoké množství nečistot, zejména zbytky potravin, usazeniny, ale v nemalé míře vždy také tuhou složku (sádlo). Tyto nečistoty jsou nežádoucí a je nezbytně nutné je před aplikací odstranit filtrací.

3.1 FILTRACE

Norma ČSN EN 590 pro motorovou naftu i ČSN 65 6516 pro řepkový olej pro spalovací motory na rostlinné oleje shodně stanoví celkový obsah nečistot v palivu maximálně 24 mg/kg paliva [1][2]. Zjištění této hodnoty se řídí normou EN 12662, tato zkouška však nebyla v dostupných laboratořích k dispozici. Analýza čistoty probíhala v laboratoři Katedry bojových a speciálních vozidel Fakulty vojenských technologií Univerzity obrany v Brně pod dozorem kpt. Ing. Josefa Glose. Ke zjištění čistoty filtrovaného oleje byla použita metoda dle normy ISO 4406, která spočívá v měření počtu částic o velikostech větších než 4, 6 a 14 μm ve vzorku. K měření bylo použito přístroje Spectro LaserNet Fines – C, jehož princip je znázorněn na Obr. 3.



Obr. 3 Schéma přístroje Spectro LaserNet Fines - C

Vzorek je nasáván pomocí peristaltického čerpadla přes měřicí celu, kterou prosvěcuje laser. Toto záření snímá kamera. Objeví-li se nečistota, laser ji neprosvítí, což je detekováno kamerou. PC software vyhodnocuje ze signálu kamery počet, velikost a tvar jednotlivých částic.



Jelikož norma neurčuje, jakých hodnot má motorová nafta dosahovat, byly dosažené výsledky porovnány se vzorkem motorové nafty odebraným z výdejního stojanu čerpací stanice. Předpokládá se přitom, že tato nafta splňuje požadavek na čistotu dle ČSN EN 590. Dále byly výsledky porovnány se vzorkem rostlinného oleje, který byl odebrán za palivovým filtrem zkušebního vozidla (viz. kap. 0). Zde platí předpoklad, že palivový filtr splňuje požadavky filtrační účinnosti stanovené výrobcem vstřikovacího systému.



Obr. 4 Přístroj Spectro LaserNet Fines - C

3.1.1 NÁVRH VÍCESTUPŇOVÉHO FILTRAČNÍHO ZAŘÍZENÍ

K filtraci rostlinného oleje bylo navrženo vícestupňové filtrační zařízení, jehož filtrační schopnost byla následně ověřena analýzou obsahu nečistot za jednotlivými stupni filtrace. Výchozím předpokladem přitom bylo sestavit kaskádu filtrů od nejhrubšího po nejjemnější, aby docházelo k postupnému oddělování částic od největších po nejmenší.

FILTR Č. 1: NETKANÁ TEXTILIE

Prvním stupněm filtrace je netkaná textilie, jejímž hlavním úkolem je oddělit tuhou složku od tekuté. Textilie je zavěšena do nádoby a slouží jako jemné síto, které zachytí sádlo a zbytky pokrmů. Tekutá složka stéká do nádoby, v níž je umístěn filtr č. 2. Naměřené množství nečistot ukazuje Tab. 1.

Tab. 1 Množství nečistot za 1. stupněm filtrace

velikost částic [μm]	>4	>6	>14
počet částic v 1 ml [-]	979695	486820	136066



FILTR Č. 2: HRUBÝ FILTR

Pro tento účel byla použita papírová vložka olejového filtru motoru LIAZ. Tato vložka není schopna zachytit nejmenší částice, je ovšem vhodná k zachycení malých částí tuhé složky, které nezachytila textilie. Díky své velikosti má vložka výhodnou kapacitu. Naměřené množství nečistot ukazuje Tab. 2.

Tab. 2 Množství nečistot za 2. stupněm filtrace

velikost částic [μm]	>4	>6	>14
počet částic v 1 ml [-]	680943	335292	131598



Obr. 5 2. stupeň filtrace – hrubý filtr

FILTR Č. 3: JEMNÝ FILTR

Zde byl použit filtr palivový, a sice rovněž z vozidla LIAZ. Tento filtr obsahuje 2 výměnné papírové vložky, hrubou a jemnou. Dosažená čistota však byla měřena pouze za jemnou vložkou. Obě vložky jsou na trhu běžně dostupné v rozumných cenách, což příznivě ovlivňuje hospodárnost filtrace. Naměřené množství nečistot ukazuje Tab. 3.

Tab. 3 Množství nečistot za 3. stupněm filtrace

velikost částic [μm]	>4	>6	>14
počet částic v 1 ml [-]	6347	2591	667



FILTR Č. 4: VELMI JEMNÝ FILTR

Posledním stupněm filtrace je vodní filtr s udávanou filtrační schopností 5 μm . Tento filtr by měl zajistit čistotu paliva srovnatelnou s porovnávacím vzorkem nafty, nebo alespoň vyšší než u vzorku rostlinného oleje odebraného za palivovým filtrem v autě. Tím by se navíc zásadně prodloužil interval výměny tohoto filtru. Naměřené množství nečistot ukazuje Tab. 4.

Tab. 4 Množství nečistot za 4. stupněm filtrace

velikost částic [μm]	>4	>6	>14
počet částic v 1 ml [-]	5642	1865	274

3.1.2 ANALÝZA POROVNÁVACÍCH VZORKŮ

Stejným způsobem byla analyzována čistota porovnávacích vzorků, výsledky měření ukazuje Tab. 5.

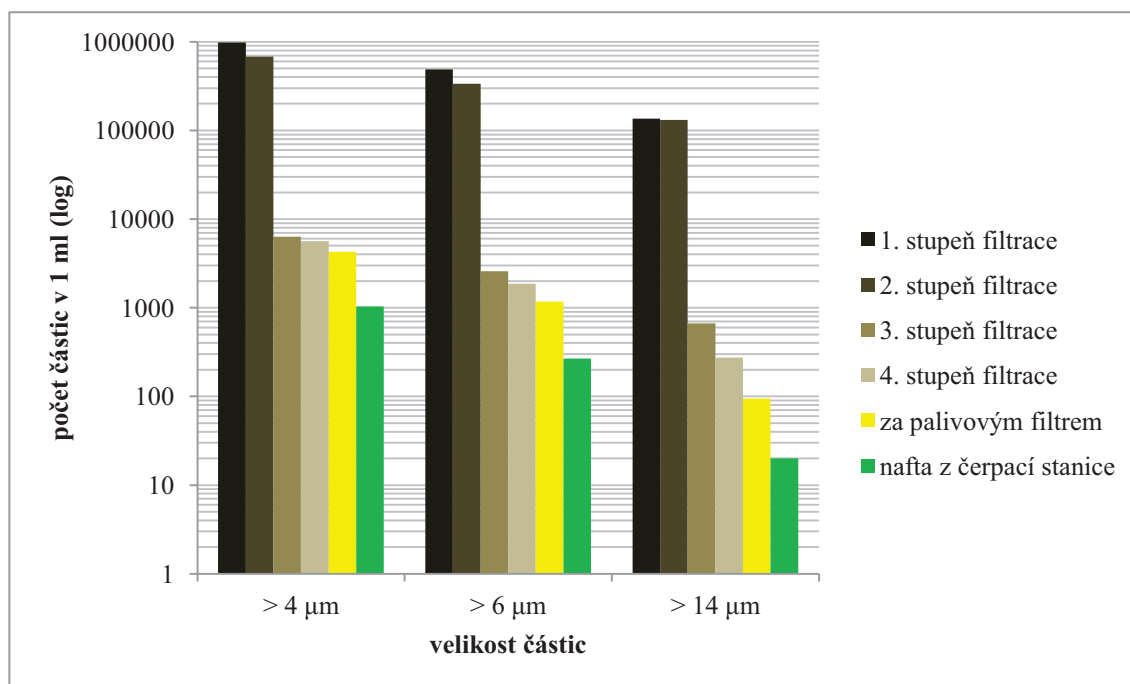
Tab. 5 Množství nečistot v porovnávacích vzorcích

velikost částic [μm]		>4	>6	>14
počet částic v 1 ml [-]	nafta z čerpací stanice	1036	267	20
	RO za palivovým filtrem	4276	1172	95



3.1.3 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

Aby mohly být jednotlivé vzorky porovnány, byly naměřené hodnoty vyneseny do grafu:



Obr. 6 Porovnání množství nečistot v jednotlivých vzorcích

Z výsledků plyne několik poznatků:

- mezi 1. a 2. stupněm filtrace je nepatrný rozdíl, naopak mezi 2. a 3. stupněm je rozdíl velký
- 4. stupeň filtrace odděluje značné množství částic větších než 14 μm, s klesající velikostí částic klesá i účinnost filtrace
- lze registrovat patrný skok mezi posledním stupněm filtrace a porovnávacím vzorkem rostlinného oleje
- rozdíl v čistotě vzorku nafty je ještě daleko markantnější

Filtrace by tedy měla být náležitě upravena:

- pro 2. stupeň zvolit jemnější vložku, aby se snížilo zanášení vložek 3. stupně
- 4. stupeň nahradit ještě jemnější vložkou, aby byla dosažena čistota odpovídající alespoň porovnávacímu vzorku rostlinného oleje
- samospádovou kaskádu filtrů nahradit systémem s hydraulickým čerpadlem, jelikož již současná konfigurace systému vykazuje značný průtočný odpor (průtok cca 5 litrů/24 hodin)



3.2 DALŠÍ ÚPRAVY

O dalších úpravách odpadního rostlinného oleje bude případně pojednáno v následující kapitole, která popisuje analýzu vybraných vlastností oleje, výsledky porovnává s předepsanými hodnotami dle norem a případně navrhuje možnosti úprav k dosažení těchto hodnot. Jedná se zejména o vytěsnění přítomné vody a přídavky aditiv.



4 LABORATORNÍ ANALÝZA ODPADNÍHO ROSTLINNÉHO OLEJE JAKO PALIVA

Laboratorní analýzy jednotlivých vlastností proběhly v rámci dispozic dostupných laboratoří, přičemž výsledky byly porovnávány s předpisy dle normy ČSN EN 590 (norma předepisující vlastnosti motorové nafty), ale také dle normy ČSN 65 6516, která předepisuje vlastnosti řepkového oleje jako paliva pro motory, které jsou ke spalování tohoto paliva upravené.

4.1 HUSTOTA

4.1.1 ZPŮSOB MĚŘENÍ

Měření hustoty probíhalo v laboratoři Katedry bojových a speciálních vozidel Fakulty vojenských technologií Univerzity obrany v Brně pod dozorem pplk. doc. Ing. Štefana Čorňáka, Dr. K měření bylo použito přístroje IROX Diesel Analyzer, který je navržen ke zjišťování různých vlastností nafty. K měření hustoty využívá měřič hustoty PAAR s přesností $\pm 0,001 \text{ g/cm}^3$ [7]. Kvůli vysoké viskozitě ovšem nebylo možné změřit hustotu rostlinného oleje, a proto bylo postupně změřeno několik vzorků smíchaných z nafty a oleje v různých hmotnostních poměrech. První vzorek přitom obsahoval čistou naftu a sloužil jako referenční. Hodnota hustoty byla následně vypočtena z dosažených výsledků na základě znalosti hustoty referenčního vzorku nafty a hmotnostního podílu rostlinného oleje v jednotlivých vzorcích. Vzorky byly namíchány takto:

Tab. 6 Vzorky pro analýzu přístrojem IROX Diesel Analyzer

č. vzorku	přibližné množství RO ve vzorku [%]	hmotnost podílu RO [g]	hmotnost podílu MN [g]	celková hmotnost vzorku [g]
1	0	0	20,01	20,01
2	10	2,02	18,01	20,03
3	20	4,03	16,00	20,03
4	30	6,00	14,03	20,03
5	40	7,99	12,01	20,00
6	50	10,01	10,00	20,01
7	60	12,03	7,98	20,01



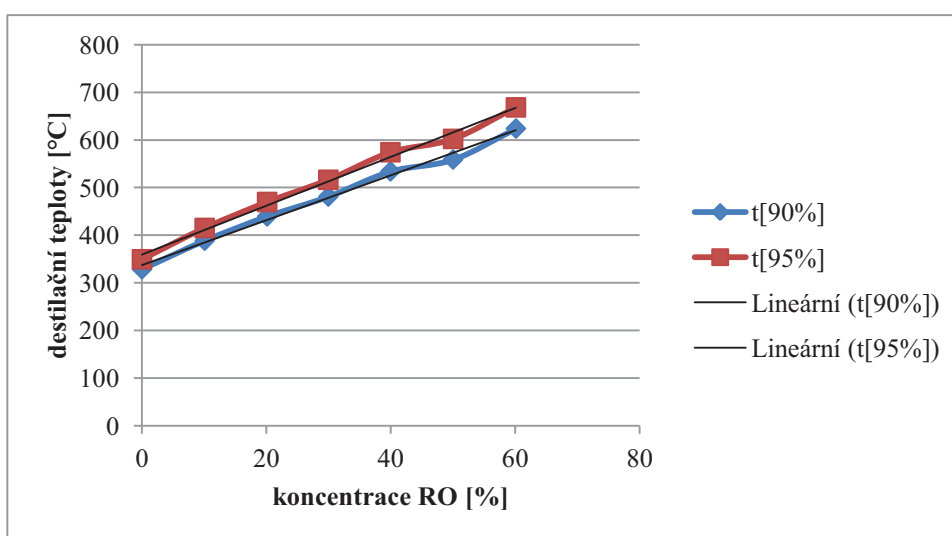
4.1.2 POSTUP VÝPOČTU

Vzorky byly připraveny na laboratorních vahách s přesností $\pm 0,01$ g. Nejdříve bylo tedy nutné určit přesnou koncentraci jednotlivých složek v každém vzorku. Ta nemusela zcela odpovídat odváženému množství, a to ze dvou důvodů: vliv může mít chyba vah, ale především nedokonalé promísení obou složek, jelikož přístroj odebírá z každého vzorku k analýze pouze 7 ml [7].



Obr. 7 Přístroj IROX Diesel Analyzer se vzorky k analýze

K problému bylo přistoupeno porovnáním všech naměřených hodnot. Bylo zjištěno, že destilační teploty se mění lineárně s rostoucí koncentrací rostlinného oleje. Hodnoty destilačních teplot byly tedy vyneseny do grafu v závislosti na koncentraci a proloženy lineární spojnici trendu.



Obr. 8 Závislost destilačních teplot vzorků na koncentraci dle analýzy IROX Diesel Analyzerem



Z grafu je patrné, že koncentrace šestého vzorku se liší od zadání. Koncentrace byly tedy upraveny za pomoci vyjádření rovnice regrese spojnice trendu, ze kterých se zpětně dopočítaly dosazením zjištěných destilačních teplot. IROX Diesel Analyzer určuje dvě destilační teploty, a sice ty, při kterých predestiluje 90% a 95% vzorku, což pomohlo hodnoty koncentrací ještě více zpřesnit.

Skutečné poměry nafty a oleje v jednotlivých vzorcích vypadají takto:

Tab. 7 Skutečné poměry nafty rostlinného oleje ve vzorcích

vzorek č.	původně předpokládané množství RO ve vzorku [%]	skutečné množství RO ve vzorku [%]
1	0	0
2	10,08	10,131
3	20,12	21,130
4	29,96	29,875
5	39,95	40,335
6	50,02	51,873
7	60,12	58,314

Jelikož se přístroj postupně zahříval, měnily se i teploty jednotlivých vzorků v analýze. Ke zjištění hustoty bylo tedy třeba nejdříve zjistit, jak se mění s teplotou hustota referenčního vzorku. Přístrojem změřená teplota vzorku č. 1 byla 23,9 °C a jeho hustota 838 kg/m³. Závislost hustoty nafty na teplotě je dána vztahem [8]:

$$\rho_n(t) = \rho_n(20) - 0,65 * (t - 20), \quad (1)$$

kde ρ_n je hustota nafty v kg/m³, t teplota v °C. Pro vzorek č. 1 tedy platí

$$\rho_n(23,9) = 838 = \rho_n(20) - 0,65 * (23,9 - 20), \quad (2)$$

z této rovnice byla vypočtena hustota nafty ve 20 °C, tedy $\rho_n(20)$:

$$\rho_n(20) = 840,535 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}. \quad (3)$$



Ke stanovení hustoty rostlinného oleje byl vybrán jeden vzorek s dostatečnou koncentrací oleje, jelikož s rostoucí koncentrací roste také přesnost výpočtu. Použito bylo vzorku č. 5, u kterého přístroj stanovil tyto hodnoty:

$$\rho = 865 \text{ kg/m}^3, \\ t = 25,5 \text{ }^\circ\text{C},$$

kde ρ je hustota vzorku. Podíl RO ve vzorku byl stanoven na 40,335 hm.%. Podle rovnice (1) byla vyjádřena hustota nafty při dané teplotě

$$\rho_n(25,5) = \rho_n(20) - 0,65 * (25,5 - 20) = 836,96 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}. \quad (4)$$

Pomocí již známých hodnot byla určena hustota RO v dané teplotě, a to dosazením do vztahu:

$$\rho_{RO}(25,5) = \frac{\rho - \rho_n(25,5) * (1 - 0,40335)}{0,40335} = 906,478 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}, \quad (5)$$

kde ρ_{RO} je hustota rostlinného oleje. Nakonec bylo nutno vyjádřit hustotu RO při teplotě 15 °C, jelikož tuto hodnotu předepisuje norma. To bylo provedeno za použití vztahu [2]

$$\rho_{RO}(t) = \rho_{RO}(15) - 0,677 * (t - 15), \quad (6)$$

$$\rho_{RO}(15) = \rho_{RO}(25,5) + 0,677 * (25,5 - 15) = 913,587 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}. \quad (7)$$

4.1.3 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

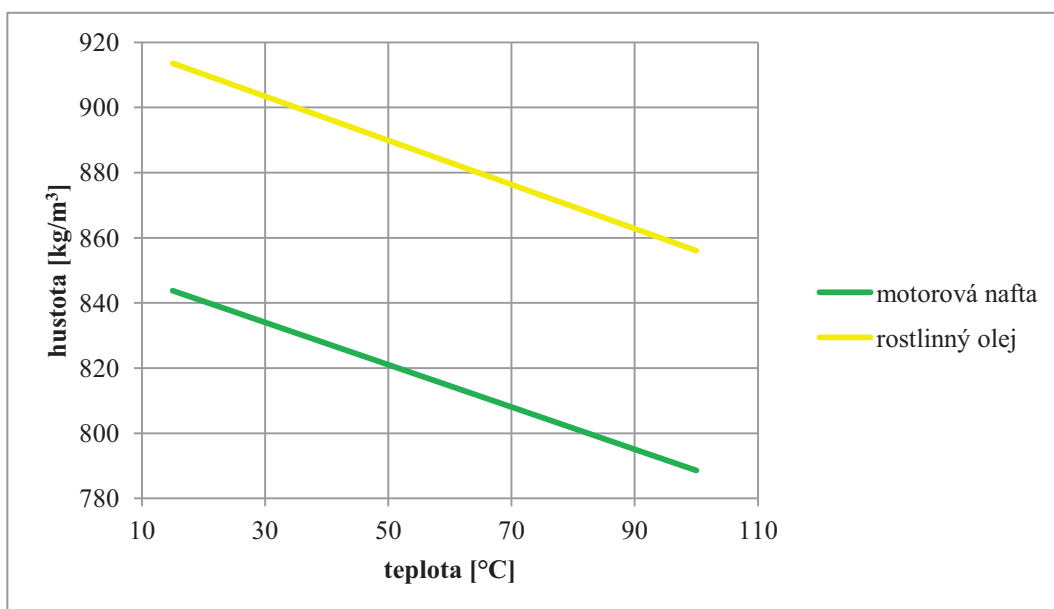
Vypočtená hodnota hustoty odpadního rostlinného oleje neodpovídá povolenému rozsahu dle normy ČSN EN 590, ovšem vyhovuje hodnotám dle normy ČSN 65 6516, jak ukazuje následující tabulka:

Tab. 8 Porovnání hustoty s hodnotami dle norem

Hustota RO při 15 °C [kg/m ³]	Hustota při 15 °C dle ČSN EN 590 [kg/m ³]		Hustota při 15 °C dle ČSN 65 6516 [kg/m ³]	
	min	max	min	max
913,587	820	845	900	930



Palivo tedy nesplňuje požadavek na hustotu k pohonu naftových motorů, splňuje však požadavek na hustotu k pohonu motoru vhodného pro rostlinný olej. V takovém motoru hustota paliva klesá díky jeho vyšší teplotě 70-80 °C (viz. kap. 0) na hodnoty přibližně 876-869 kg/m³.



Obr. 9 Graf závislosti hustoty motorové nafty a rostlinného oleje na teplotě

4.2 VISKOZITA

4.2.1 ZPŮSOB MĚŘENÍ

Měření viskozity probíhalo v laboratoři Ústavu konstruování Fakulty strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně pod dozorem Ing. Jakuba Roupce, Ph.D. K měření bylo použito rotačního viskozimetru Haake RotoVisco1 se snímačem Z20-Ti a PC softwaru RheoWin 4. Rotující snímač je ponořen ve sledované kapalině, mezi kapalinou a snímačem vzniká smykové napětí, jehož velikost je závislá na viskozitě. Toto napětí způsobuje točivý moment, který působí na snímač proti směru jeho rotace. Velikost momentu je přístrojem měřena a pomocí dalších známých hodnot (vlastnosti snímače, množství kapaliny, hloubka zanoření snímače, otáčky) software počítá dynamickou viskozitu, kterou zaznamenává spolu s teplotou vzorku v nastavených intervalech do souboru. Teplotu vzorku lze měnit připojeným chladicím/ohřívacím zařízením, což umožňuje stanovit závislost viskozity na teplotě. Každé měření trvalo 30 vteřin, během kterých bylo zaznamenáno 100 hodnot dynamické viskozity a teploty. 10 prvních hodnot bylo z každého měření odstraněno, jelikož měřený moment je při rozběhu snímače na začátku měření navýšen momentem setrvačnosti snímače a tyto hodnoty by způsobovaly chybu. Zbývající hodnoty byly zprůměrovány a vyneseny do Tab. 9 pro naftu a Tab. 10 pro rostlinný olej:



Tab. 9 Motorová nafta: závislost dynamické viskozity na teplotě

teplota [°C]	9,67	14,56	19,82	25,39	39,81
dynamická viskozita [mPa*s]	6,187	5,325	4,700	4,294	4,035

Tab. 10 Rostlinný olej: závislost dynamické viskozity na teplotě

teplota [°C]	25,20	36,87	51,34	68,67	83,77	95,88
dynamická viskozita [mPa*s]	77,817	49,326	30,486	18,810	13,476	10,621

Jsou tedy známy hodnoty dynamických viskozit jednotlivých paliv. Norma ovšem stanoví povolené hodnoty pro kinematickou viskozitu, která musela být z dynamické viskozity vypočtena.

4.2.2 POSTUP VÝPOČTU

Vztah mezi kinematickou a dynamickou viskozitou je určen rovnicí:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}, \quad (8)$$

kde ν je kinematická viskozita, η je dynamická viskozita a ρ je hustota kapaliny. Pomocí rovnice (6) a (8) byly vypočteny kinematické viskozity nafty i rostlinného oleje:

Tab. 11 Motorová nafta: závislost kinematické viskozity na teplotě

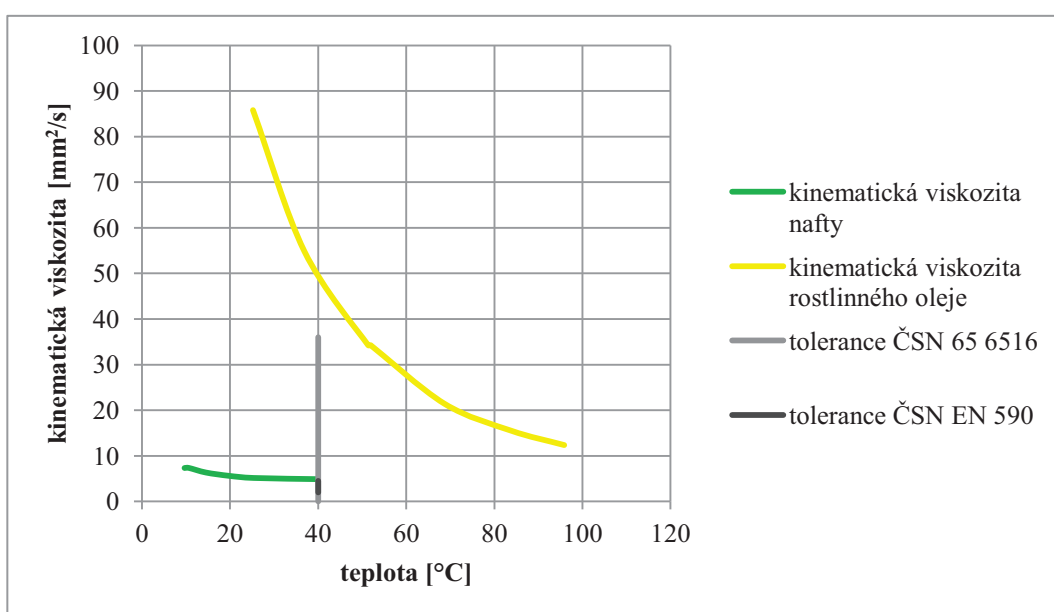
teplota [°C]	9,67	14,56	19,82	25,39	39,81
kinematická viskozita [mm²/s]	7,302	6,309	5,591	5,130	4,875



Tab. 12 Rostlinný olej: závislost kinematické viskozity na teplotě

teplota [°C]	25,20	36,87	51,34	68,67	83,77	95,88
kinematická viskozita [mm ² /s]	85,826	54,881	34,293	21,442	15,543	12,367

Pro porovnání byly hodnoty vyneseny do společného grafu:



Obr. 10 Graf závislosti kinematické viskozity motorové nafty a rostlinného oleje na teplotě s vyznačenými rozmezími povolených hodnot dle norem

4.2.3 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

Z grafu je patrné, že viskozita oleje je mnohem více závislá na teplotě než viskozita nafty. Rostlinný olej je tedy nutno pro použití ve spalovacím motoru co nejvíce ohřát. Avšak ani při teplotách kolem 100 °C nedosahuje viskozita oleje hodnot nafty. V grafu jsou též vyznačeny tolerance hodnot podle norem ČSN EN 590 i ČSN 65 6516. Výsledek ukazuje, že ani jedno zkoušené palivo povoleným hodnotám neodpovídá, přičemž viskozita oleje překračuje limit v daleko větší míře. Dosažení viskozity nafty je u rostlinného oleje pouhým ohřevem prakticky nemožné, takový ohřev by byl energeticky velmi náročný a teplota paliva by pravděpodobně převyšovala únosnou teplotu některých částí palivového systému, zejména palivového vedení. Byly vyvinuty snahy aditivovat olej přídatkem ke snížení viskozity, běžný trh však nabízí pouze přísady k navýšení viskozity.



4.3 MAZIVOST

Mazivost je velmi významnou vlastností paliva, jelikož palivo ve vznětových motorech zajišťuje mazání všech třecích ploch ve vstřikovacím systému (kromě moderních systémů common rail a některých řadových vstřikovacích čerpadel). Aby nedocházelo k destrukci či nadměrnému opotřebení dílčích částí systému, je nutné, aby rostlinný olej splňoval či nejlépe překračoval minimální hodnoty stanovené normou.

4.3.1 ZPŮSOB MĚŘENÍ

Norma ČSN EN 590 stanoví pro mazivost maximální hodnotu korigovaného průměru oděrové plochy při 60 °C 460 μm , a to na základě zkoušky dle normy EN ISO 12156-1 [1]. Norma ČSN 65 6516 mazivost paliva nepředepisuje. Zkouška dle EN ISO 12156-1 nebyla v dostupných laboratořích k dispozici, a proto byla nahrazena zkouškou na zařízení Tribotester, na němž proběhla analýza vzorku rostlinného oleje a nafty a výsledky byly vzájemně porovnány.

Měření mazivosti probíhalo v laboratoři Ústavu konstruování Fakulty strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně pod dozorem doc. Ing. Ivana Mazúrka, CSc. Zařízení Tribotester funguje na principu vyvolání kontaktního tlaku mezi dvěma po sobě se pohybujícími plochami, jež jsou smáčeny analyzovanou kapalinou. Kontaktní plocha je tvořena stykem dvou ocelových válcových těles, která jsou uložena vůči sobě kolmo. Prvním tělesem je kotouč o průměru 35 mm a tloušťce 9 mm, který je připevněn k elektromotoru a koná rotační pohyb. Druhým tělesem je ložiskový váleček o průměru 10 mm a délce 14 mm. Jeden váleček dosedá na kotouč v nejnižším a druhý v nejvyšším bodě kotouče, a to tak, že osy válečků jsou rovnoběžné s tečnou obvodu kotouče. Při rotaci tím nedochází k odvalování, ale ke smýkání. Na povrchu válečků dochází k otěru. Kontakt dvou kolmých válců je velmi blízký kontaktu dvou koulí, z čehož plyne, že iniciační kontakt je bodový. S mírou opotřebení válečku (vnikání kotouče do válečku) roste velikost styčné plochy, a tím klesá (při konstantní zatěžovací síle) kontaktní tlak. Otěr povrchu válečku je zastaven v momentě, kdy velikost kontaktního tlaku klesne natolik, že mezi tělesy dojde ke vzniku hydrodynamické mazací vrstvy. Velikost styčné plochy po ukončení zkoušky reflektuje mazací schopnosti analyzované kapaliny. Doba trvání zkoušky je časovým spínačem omezena na jednu minutu.



Obr. 11 Zařízení Tribotester



Obr. 12 Detail uložení ložiskových válečků



4.3.2 POSTUP VÝPOČTU

K porovnání mazivosti jednotlivých vzorků postačí rozdíly ve velikosti vybroušených ploch. Pro lepší představu o odolnosti kapaliny vůči přerušení mazací vrstvy je však dobré vyjádřit rozdíl poměrem tlaků mezi styčnými plochami. K tomu je třeba znát sílu, kterou jsou tělesa přitlačována.

Přítlak zajišťuje soustava závaží a pák. Síla působící shora je vyvozována závažím o hmotnosti $m_1 = 1,916 \text{ kg}$ v kombinaci s pákovým ústrojím, jehož celkový poměr je 8,722:1. Výsledná síla je tedy rovna

$$F_1 = 8,722 * m_1 * g = 8,722 * 1,916 \text{ kg} * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 163,94 \text{ N}, \quad (9)$$

kde g je gravitační zrychlení. Sílu působící zespodu vyvozuje závaží o hmotnosti $m_2 = 4,480 \text{ kg}$ na páce o poměru 3,759:1. Spodní síla má tedy velikost

$$F_2 = 3,759 * m_2 * g = 3,759 * 4,480 \text{ kg} * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 165,20 \text{ N}. \quad (10)$$

Pro úplnost můžeme vyjádřit velikost iniciačního tlaku mezi styčnými plochami. Úloha je řešena jako styk dvou koulí o různých poloměrech pomocí Hertzovy teorie kontaktu. Velikost tohoto tlaku je dána vztahem [4]:

$$p_0 = \frac{\sqrt[3]{6}}{\pi} \left(\frac{E_{red}}{R_e} \right)^{\frac{2}{3}} * F^{\frac{1}{3}}, \quad (11)$$

kde E_{red} je redukovaný modul pružnosti v tahu, R_e ekvivalentní poloměr a F přitlačná síla.

$$\frac{1}{E_{red}} = \frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \quad (12)$$

Pro ocel platí $E = 2,1 * 10^5 \text{ MPa}$ a $\mu = 0,3$. Dosazením do rovnice (12) vypočítáme $E_{red} = 1,153846 * 10^5 \text{ MPa}$.

$$\frac{1}{R_e} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (13)$$

Dosazením příslušných poloměrů získáme $R_e = 7,778 \text{ mm}$.

Dosazením vypočtených hodnot do rovnice (11) získáme velikost iniciačního tlaku mezi styčnými plochami:

$$p_0 = \frac{\sqrt[3]{6}}{\pi} \left(\frac{1,153846 * 10^5 \text{ MPa}}{7,778 \text{ mm}} \right)^{\frac{2}{3}} * 165,2 \text{ N}^{\frac{1}{3}} = 1916,125 \text{ MPa}. \quad (14)$$



Pro porovnání obou vzorků je ovšem stěžejní konečný tlak. Přítlačná síla přitom zůstává po celou dobu zkoušky stejná, takže stačí změřit velikost styčné plochy na zkušebním válečku. Vybroušená plocha má charakter elipsy, a proto byly aplikovány vztahy platné pro geometrii elipsy. Byla změřena délka hlavní a vedlejší osy. Měřeno bylo posuvným měřidlem s přesností 0,05 mm. Velikost plochy S byla vypočtena podle vztahu

$$S = \pi * a * b, \quad (15)$$

kde a je délka hlavní poloosy a b je délka vedlejší poloosy.

Konečný tlak p pak odpovídá vztahu:

$$p = \frac{F}{S}. \quad (16)$$

S každým vzorkem byla provedena dvě měření. Dále byla provedena dvě měření se vzorkem nového rostlinného oleje, aby mohla být porovnána mazivost oleje nového a použitého. Výsledky měření a výpočty konečných tlaků jsou zaneseny do Tab. 13.

Tab. 13 Výsledky měření mazivosti a výpočet konečných tlaků mezi styčnými plochami

		délka hlavní osy 2a [mm]	délka vedlejší osy 2b [mm]	velikost styčné plochy [mm ²]	konečný kontaktní tlak p [MPa]
motorová nafta	1. měření	7,05	3,80	21,041	7,851
	2. měření	6,75	3,95	20,941	7,889
filtrovaný odpadní rostlinný olej	1. měření	4,05	2,10	6,680	24,731
	2. měření	3,60	2,10	5,938	27,821
nový rostlinný olej	1. měření	4,30	2,50	8,443	19,567
	2. měření	4,20	2,50	8,247	20,032



4.3.3 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

Z uvedených výsledků zkoušky je patrné, že k proražení mazací vrstvy je u odpadního rostlinného oleje zapotřebí asi třikrát vyšší tlak. Z toho jednoznačně vyplývá, že mazivost oleje není třeba zlepšovat aditivu.

Zároveň analýza ukázala rozdíl v mazivosti nového a použitého oleje, a sice ve prospěch použitého. Nebylo zjišťováno, čím je tento rozdíl způsoben, avšak do značné míry se může jednat o chybu měření. Pro zpřesnění výsledku by jistě bylo přínosné určit velikosti výsledných styčných ploch vhodným optickým přístrojem. Rozdíl mezi naftou a olejem je ovšem tak markantní, že přípustná chyba ve výsledku je vůči němu jistě zanedbatelná. Rozdíl je naprosto zřejmý pouhým pohledem, jak dokládá Obr. 13.



Obr. 13 Výsledek zkoušky mazivosti, otěr na ložiskovém válečku: nalevo zkouška rostlinného oleje, napravo zkouška nafty

4.4 OBSAH VODY

Maximální obsah vody v palivu stanoví norma ČSN EN 590 i ČSN 65 6516, přičemž obě shodně předepisují k analýze metodu dle EN ISO 12937. Norma pro naftu udává maximum 200 mg vody/kg paliva, norma pro řepkový olej je benevolentnější a dovoluje až 0,075 hm.%, což odpovídá 750 mg vody/kg paliva [1][2].

4.4.1 ZPŮSOB MĚŘENÍ

Zkouška na obsah vody probíhala v laboratoři Katedry bojových a speciálních vozidel Fakulty vojenských technologií Univerzity obrany v Brně pod dozorem kpt. Ing. Josefa Glose. Byla použita poměrně jednoduchá metoda zjištění přítomnosti vody, tzv. „prskací test“, který je součástí přenosné tribotechnické soupravy Tribo-1 od Automobilního opravárenského závodu Český Dub.



Na fólii přístroje se kápne malé množství dobře promíchaného oleje, který se následně zespolu intenzivně zahřívá plamenem. Začne-li olej po chvílce prskat, je to způsobeno odpařováním přítomné vody, výsledek na přítomnost vody je tedy pozitivní a je potřeba provést zkoušku ke stanovení množství obsažené vody.



*Obr. 14 Analýza obsahu vody: prskací test
soupravy Tribo-1*

4.4.2 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

Olej ani po delším ohřívání neprskal, zkouška na přítomnost vody je tedy negativní. V tomto ohledu palivo splňuje předpis obou norem a není třeba jej před aplikací nijak upravovat.

4.5 BOD VZPLANUTÍ

Bod vzplanutí je jednou ze základních charakteristik paliva. Určuje, při jaké teplotě výpary paliva se směsí se vzduchem hoří. Tato hodnota nesmí být příliš nízká, aby nemohlo dojít k samovolnému vznícení mimo spalovací prostor. Zároveň však příliš vysoké hodnoty mohou ztěžovat spuštění studeného motoru a mají negativní vliv na tvorbu emisí HC díky zhašení plamene v blízkosti studených stěn válce. Norma předepisuje pouze spodní hranici, přičemž pro naftu platí dle ČSN EN 590 minimální hodnota 55 °C [1] a pro řepkový olej dle ČSN 65 6516 hodnota 220 °C [2].



4.5.1 ZPŮSOB MĚŘENÍ

Měření proběhlo v laboratoři Katedry bojových a speciálních vozidel Fakulty vojenských technologií Univerzity obrany v Brně pod dozorem kpt. Ing. Josefa Glose, a to metodou otevřeného kelímku dle ISO 2592. K tomu posloužil přístroj Normalab Analis NCL 220. Do kelímku s teploměrem se nalije palivo, které je zespodu ohříváno. Nad kelímkem se průběžně přejíždí plamínkem a sleduje se aktuální teplota paliva. Při dosažení teploty vzplanutí plamínek zapálí výpary nad hladinou paliva.



*Obr. 15 Analýza bodu vzplanutí: přístroj
Normalab Analis NCL 220*

4.5.2 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

Teplota vzplanutí byla touto metodou stanovena na 301 °C. Tato hodnota splňuje požadavky obou norem, palivo je tedy bezpečné. K zajištění bezpečných studených startů a také k zabránění růstu emisí HC je třeba vozidlo upravit na dvounádržový palivový systém (kap. 5), který umožní startovat a zahřívát motor provozem na naftu.



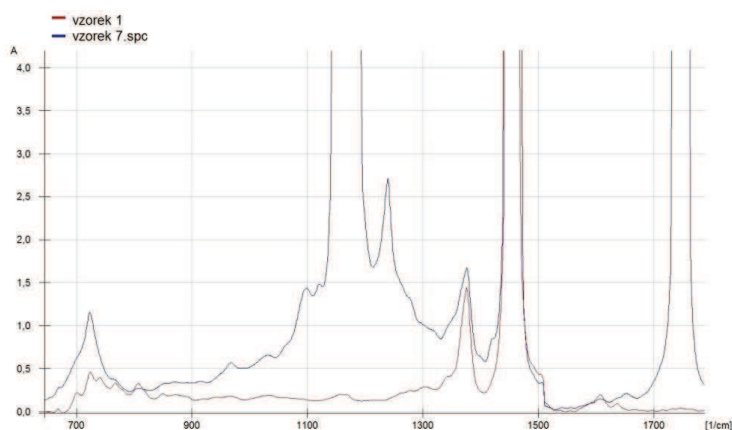
4.6 POLYCYKlickÉ AROMATICKÉ UHLOVODÍKY

Obsah polycyklických aromatických uhlovodíků je parametr, jehož dovolené hodnoty se neustále zpřísňují. Důvodem je prokázaný negativní vliv na organismus. Jedná se o cyklické uhlovodíky s nejméně dvěma jádry, které vznikají zejména nedokonalým spalováním [9]. Norma ČSN EN 590 předepisuje pro naftu maximální podíl polyaromatických uhlovodíků 8 hm.% [1]. Norma ČSN 65 6516 pro řepkový olej nepředepisuje nic. Vzhledem k tomu, že odpadní rostlinný olej byl původně určen k využití v potravinářském průmyslu, můžeme vyjít z předpokladu, že také plnil požadavek na obsah polyaromatických uhlovodíků dle příslušné potravinářské normy. Ta stanoví rozsah množství na 3,4 až 68 ppm [10], což je ve srovnání s normou pro naftu hodnota prakticky zanedbatelná. Obsah těchto uhlovodíků však může vzrůst v důsledku použití oleje ke smažení či grilování [9].

4.6.1 ZPŮSOB MĚŘENÍ

Měření bylo provedeno v laboratoři Katedry bojových a speciálních vozidel Fakulty vojenských technologií Univerzity obrany v Brně pod dozorem pplk. doc. Ing. Štefana Čorňáka, Dr. K měření bylo použito přístroje IROX Diesel Analyzer, o kterém již bylo pojednáno v kap. 4.1. Tento přístroj disponuje mid-FTIR spektrometrem. Infračervená spektroskopie je analytická technika určená především pro strukturní charakterizaci organických sloučenin a anorganických látek. Princip je založen na interakci infračerveného záření se vzorkem, při níž dochází ke změnám stavů molekul. Analytickým výstupem je pak infračervené spektrum, které graficky znázorňuje závislost absorpce na vlnové délce dopadajícího záření [11]. Přístroj IROX Diesel Analyzer je vybaven algoritmem, který na základě na základě této závislosti dokáže vyhodnotit tyto parametry nafty:

- obsah biosložky [obj.%]
- množství aromatických uhlovodíků [obj.%]
- množství polycyklických aromatických uhlovodíků [obj.%]
- cetanové číslo
- cetanový index
- množství aditiva pro zlepšení cetanového čísla [ppm]
- destilační teploty, při kterých predestiluje 90% a 95% paliva [°C]



Obr. 16 Grafická závislost absorpce na vlnové délce IČ spektra



Analyzované vzorky byly popsány podrobně v kap. 4.1. k analýze bylo připraveno 7 vzorků s různými koncentracemi rostlinného oleje v naftě, a to od 0 do 60%. Bohužel se IR spektrum oleje liší od nafty takovou měrou, že algoritmus v přístroji nedokázal většinu parametrů vyhodnotit.

4.6.2 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

Jediný parametr, který přístroj dokázal pomocí mid-FTIR analýzy stanovit, je množství aromatických uhlovodíků. Vzorek č. 1, tedy čistá motorová nafta, vykázal 0,1 obj.% množství polycyklických aromatických uhlovodíků. Již u vzorku 2, tedy vzorku s přibližně 10% koncentrací rostlinného oleje, byl naměřen nulový obsah těchto uhlovodíků. Tento výsledek lze vysvětlit tím, že koncentrace klesla pod měřitelnou úroveň. Z hlediska obsahu polycyklických aromatických uhlovodíků tedy palivo splňuje rozsah stanovený normou a není nutno jej v tomto ohledu upravovat.

4.7 OBSAH FOSFORU

Fosfor je látka, která působí jako katalytický jed zejména v oxidačních katalyzátorech a způsobuje zvýšené ucpávání filtrů pevných částic, které není vratné jejich regenerací [12]. Obsah fosforu v palivu je tedy nutno zvláště u moderních vznětových motorů co nejvíce omezit. Norma ČSN EN 590 pro naftu obsah fosforu nestanovuje. Norma ČSN 65 6516 pro řepkový olej stanoví maximální množství fosforu v palivu 12 mg/kg paliva [2].

4.7.1 ZPŮSOB MĚŘENÍ

Měření proběhlo v laboratoři Katedry bojových a speciálních vozidel Fakulty vojenských technologií Univerzity obrany v Brně pod dozorem kpt. Ing. Josefa Glose za použití přístroje Spectro Spectroil Q100, což je atomový emisní spektrometr s rotační diskovou elektrodou. Pomocí elektrody je analyzovaný vzorek atomizován a detektor záření snímá elektromagnetické záření emitované hmotou. PC software následně analyzuje množství různých chemických prvků, zejména ořetových kovů, kontaminantů a aditiv.

4.7.2 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

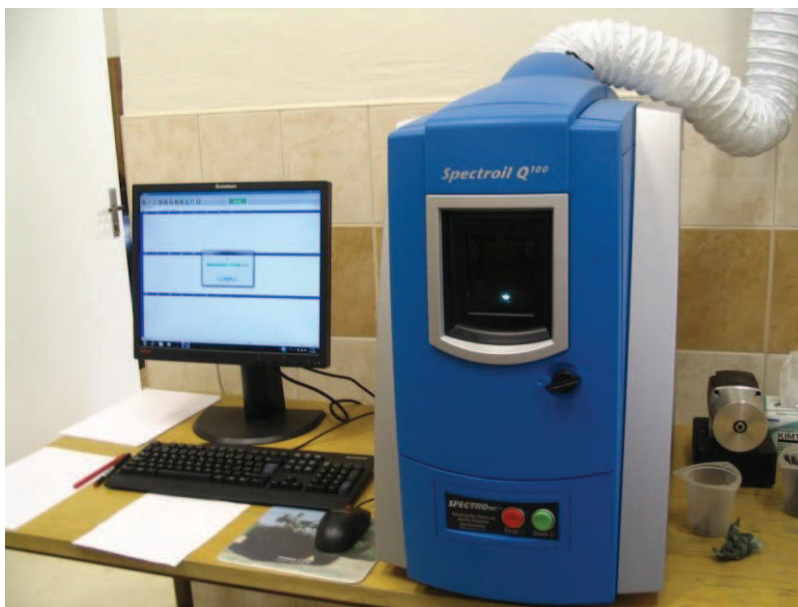
Přístroj naměřil ve vzorku rostlinného oleje 18,2 ppm fosforu, tedy 18,2 mg/kg paliva. Hodnota překračuje normu o cca 50%. Zvýšený obsah fosforu je způsoben lisováním zatepla, u olejů lisovaných zastudena tento problém odpadá, jejich výroba je však dražší kvůli nižší výtěžnosti, a proto se v potravinářském průmyslu nevyužívá. Existují látky používané zejména v čističkách odpadních vod, které dokážou fosfor navázat a následně je tato sloučenina zachycena filtrací. Fosfor je následně recyklován. Při použití rostlinného oleje ve větším měřítku by toto jistě byla možná metoda, kterou by se nežádoucí fosfor přenesl do odvětví, v němž je potřebný.



4.8 KOVY II. SKUPINY

Mezi kovy II. skupiny se řadí Mg a Ca. Norma ČSN EN 590 pro naftu obsah těchto kovů nelimituje, norma ČSN 65 6516 pro řepkový olej stanoví maximálně 20 mg/kg paliva.

Způsob měření je shodný s měřením obsahu fosforu (kap. 4.7.1).



Obr. 17 Přístroj Spectro Spectroil Q100

4.8.1 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

Množství Mg bylo přístrojem stanoveno na 1,31 ppm, množství Ca 1,71 ppm. Celkové množství kovů II. skupiny je tedy 3,02 ppm, což odpovídá 3,02 mg/kg paliva. Palivo není potřeba v tomto ohledu jakkoli upravit.

4.9 PĚNIVOST

Pěnivost je vlastnost paliva, kterou sice žádná norma nepředepisuje, má ovšem významný vliv na správnou funkci vstřikovacího systému, jelikož určuje, do jaké míry reaguje palivo s volným vzduchem pěněním. Tato reakce může způsobovat nežádoucí zavzdušňování palivového a vstřikovacího systému. Vzduch se přitom do systému může dostat netěsností, ale především přepady vstřikovačů a dále zpětným vedením paliva do nádrže. Je-li palivo náchylné k pěnění, tedy trvá-li dlouho, než se oddělí vzduch, je zpěněné palivo opět nasáváno z nádrže do systému. Snížená pěnivost také usnadňuje tankování. Je tedy velmi žádoucí pěnivost paliva co nejvíce omezit.



Ústav paliv a maziv, a.s. provedl pro redakci časopisu Autodiesel test vlivu na trhu dostupných dieselových aditiv na změnu různých vlastností a jednou z těchto vlastností byla právě pěnovost nafty. V testu nejlépe obstálo aditivum VIF Super Diesel Aditiv [13]. Byla tedy provedena analýza, zda bude mít vliv také na pěnovost rostlinného oleje. Dále bylo testováno, jakou měrou pěnovost závisí na teplotě.

4.9.1 ZPŮSOB MĚŘENÍ

Analýza probíhala na třech vzorcích o různé koncentraci aditiva, přičemž každý vzorek byl testován při 20 °C a 70 °C. První vzorek neobsahoval žádné aditivum, druhý obsahoval množství doporučené výrobcem, tedy 1:1000 neboli 1 ml/l paliva, a třetí dvojnásobek doporučené dávky, tedy 1:500 neboli 2 ml/l paliva.

Postup zkoušky vypadal následovně:

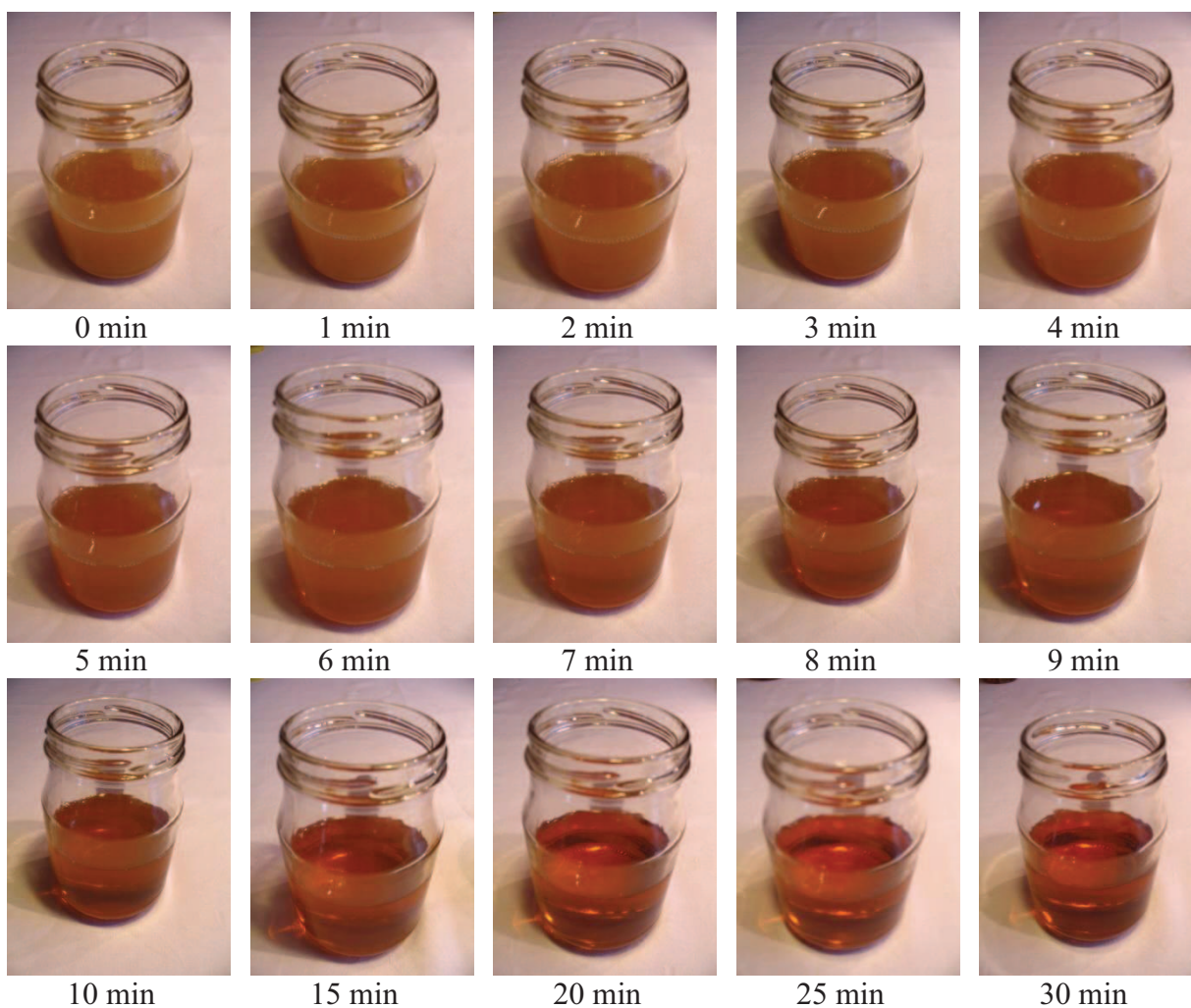
Se vzorkem bylo nejdříve 1 minutu intenzivně třepáno, aby došlo k masivnímu promísení paliva se vzduchem. Dále byly v čase sledovány 2 jevy, a to zánik pěny na hladině a vytěsnění bublinek vzduchu z objemu kapaliny.

4.9.2 PRŮBĚH ZKOUŠKY

Vzorek byl během zkoušky fotografován v intervalu jedné minuty, tyto fotografie jsou pro ukázkou seřazeny v příslušných tabulkách.

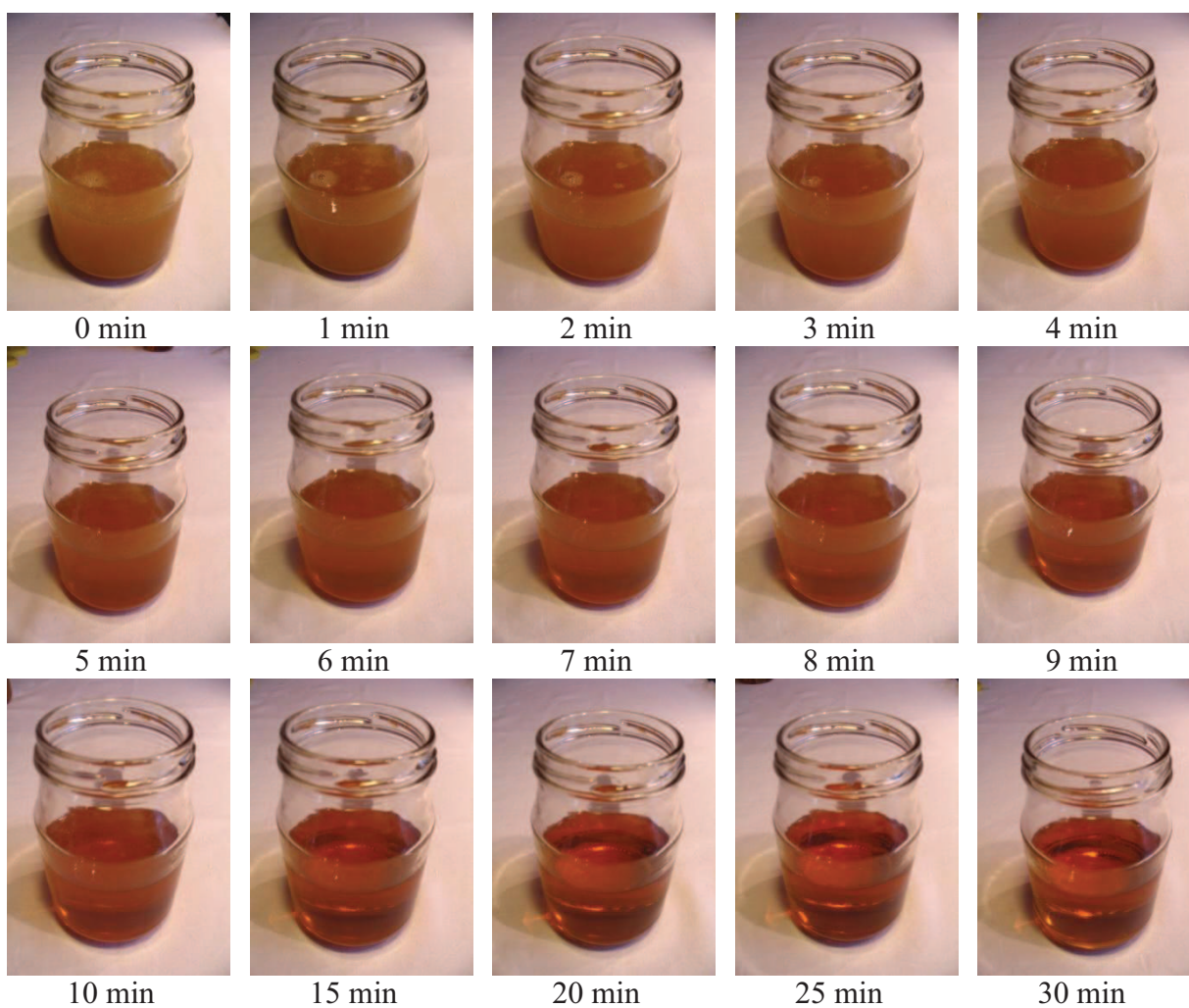
**VZOREK Č. 1, 20 °C**

0 min:	přítomnost velkého množství vzduchových bublin, kapalina neprůhledná, pěna na hladině nevýrazná
1 min:	konzistence beze změny, pěna již pouze smáčí stěny zkumavky
4 min:	bublíny se zmenšují, kapalina se stává průhlednou
10 min:	značná přítomnost jemných bublinek v celém objemu kapaliny
15 min:	jemné bublinky ustupují směrem k hladině, u dna čirá kapalina
25 min:	kapalina již téměř neobsahuje vzduchové bublinky
30 min:	kapalina je čirá v celém objemu

Tab. 14 Zkouška pěnivosti: vzorek č. 1, 20 °C

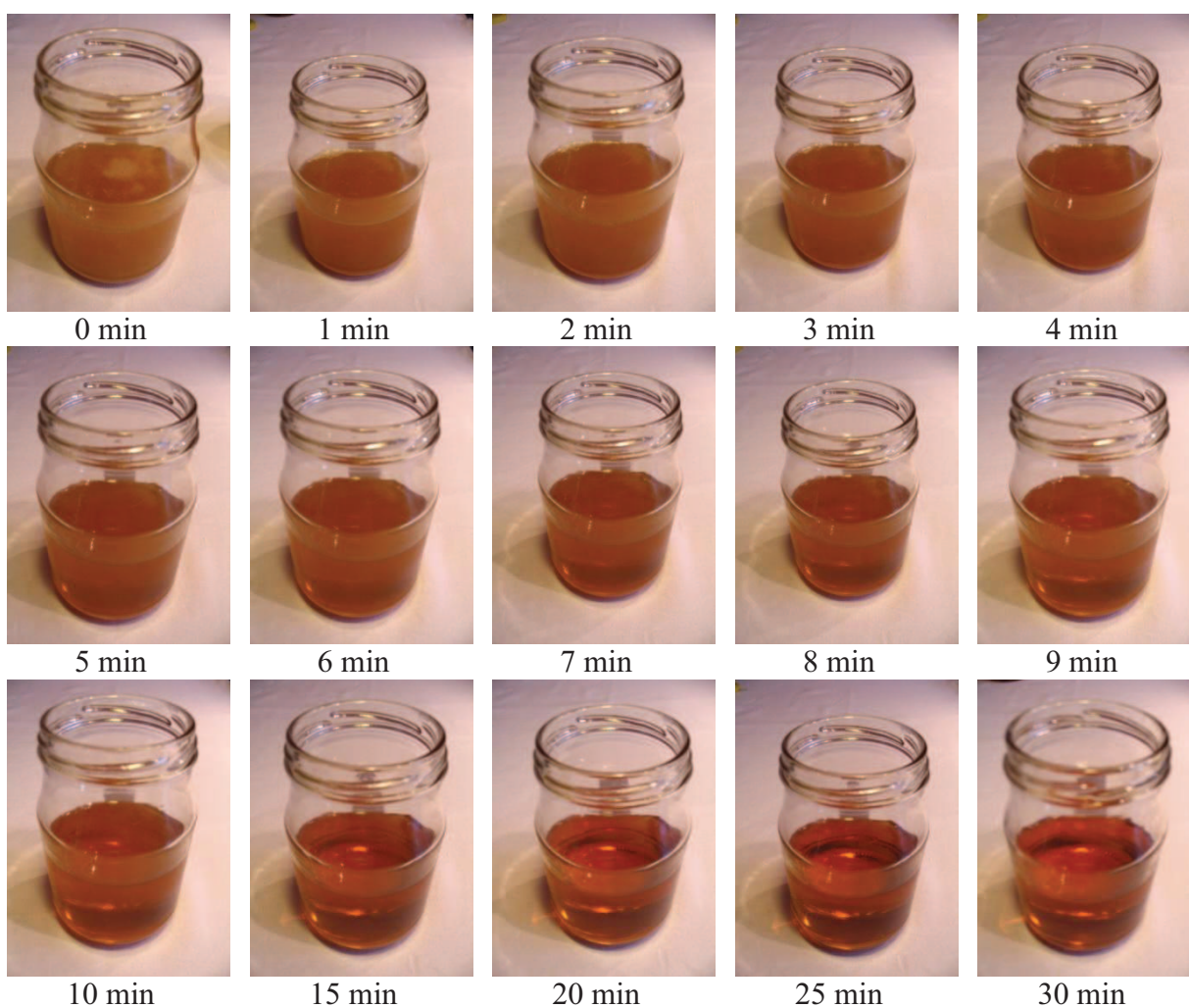
**VZOREK Č. 2, 20 °C**

- 0 min: stav odpovídá předchozímu vzorku, pěna na hladině je menší
3 min: kapalina se stává průhlednou, stále velká přítomnost bublin
4 min: z hladiny mizí pěna
7 min: značná přítomnost jemných bublinek v celém objemu kapaliny
15 min: jemné bublinky ustupují směrem k hladině, u dna čirá kapalina
25 min: kapalina již téměř neobsahuje vzduchové bublinky
30 min: kapalina je čirá v celém objemu

Tab. 15 Zkouška pěnivosti: vzorek č. 2, 20 °C

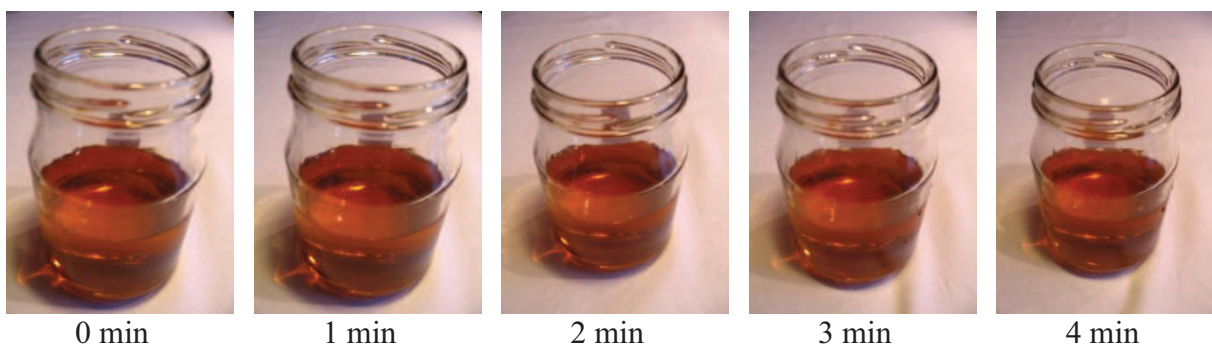
**VZOREK Č. 3, 20 °C**

- 0 min: stav odpovídá předchozímu vzorku
1 min: z hladiny mizí pěna
3 min: kapalina se stává průhlednou, stále velká přítomnost bublin
7 min: značná přítomnost jemných bublinek v celém objemu kapaliny
15 min: jemné bublinky ustupují směrem k hladině, u dna čirá kapalina
25 min: kapalina již téměř neobsahuje vzduchové bublinky
30 min: kapalina je čirá v celém objemu

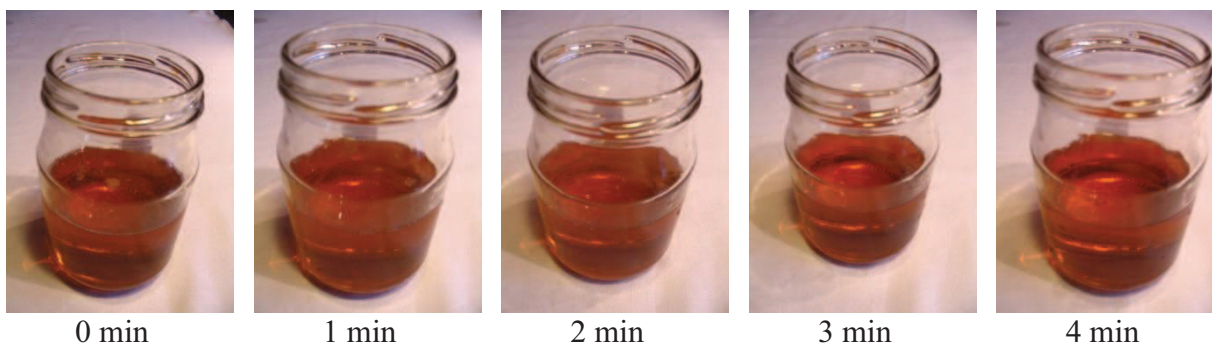
Tab. 16 Zkouška pěnivosti: vzorek č. 3, 20 °C

**VZOREK Č. 1, 70 °C**

- 0 min: pěna na hladině se netvoří, kapalina obsahuje pouze velmi jemné bublinky vzduchu v celém objemu
1 min: bublinky rychle postupují od dna k hladině
4 min: zkouška ukončena, kapalina čirá v celém objemu

Tab. 17 Zkouška pěnivosti: vzorek č. 1, 70 °C**VZOREK Č. 2, 70 °C**

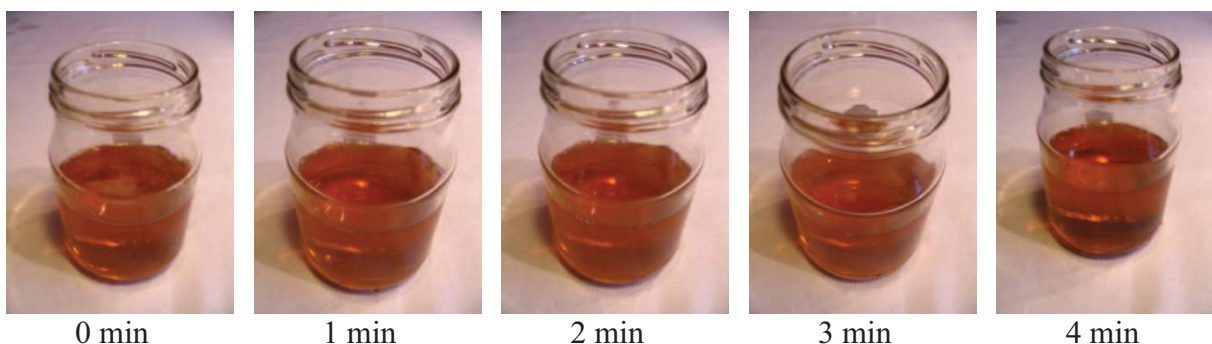
- 0 min: zanedbatelný výskyt pěny na hladině, kapalina obsahuje pouze velmi jemné bublinky vzduchu v celém objemu
1 min: hladina bez pěny, bublinky rychle postupují od dna k hladině
4 min: zkouška ukončena, kapalina čirá v celém objemu

Tab. 18 Zkouška pěnivosti: vzorek č. 2, 70 °C

**VZOREK Č. 3, 70 °C**

- 0 min: větší výskyt pěny na hladině než u předchozího vzorku, kapalina obsahuje pouze velmi jemné bublinky vzduchu v celém objemu
 1 min: hladina bez pěny, bublinky rychle postupují od dna k hladině
 4 min: zkouška ukončena, kapalina čirá v celém objemu

Tab. 19 Zkouška pěnivosti: vzorek č. 3, 70 °C

**4.9.3 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ**

Rostlinný olej je kapalina, která při mísení se vzduchem reaguje spíše vázáním bublin vzduchu v objemu kapaliny než tvorbou pěny na hladině. To však nese ještě větší nevýhodu, jelikož vytěsnění těchto bublin trvá neúnosně dlouho. Z tohoto důvodu je olej při běžné teplotě prakticky nepoužitelný. Zcela opačných vlastností však nabývá po ohřevu, kdy se stává vůči reakcím se vzduchem takřka zcela netečným. Je to tedy další z důvodů, proč je nutno olej při použití ve spalovacím motoru ohřívat. Přídavek aditiva v tomto případě přínosný nebyl, v ohřátém stavu měl dokonce negativní dopad na tvorbu pěny na hladině.

4.10 VÝHŘEVNOST

Výhřevnost vyjadřuje množství chemické energie uložené v 1 kg paliva. Pro naftu obecně platí hodnota 42,5 MJ/kg, pro řepkový olej pak 37 MJ/kg [3]. Norma ČSN 65 6516 stanoví minimální hodnotu výhřevnosti pro řepkový olej 36 MJ/kg [2]. Z těchto hodnot by mohla vzniknout domněnka, že vznětový motor optimalizovaný pro pohon motorovou naftou by při provozu na rostlinný olej vykazoval nižší výkon. Je však nutné uvědomit si dva zásadní vlivy, které tuto domněnku lehce vyvrátí, a sice že vstřikovaná dávka paliva je odměřována objemově, nikoli hmotnostně, a dále že hustota rostlinného oleje je vyšší než u nafty. Je tedy vhodné stanovit spíše objemovou výhřevnost než hmotnostní. V kap. 4.1 byla stanovena hustota nafty i odpadního rostlinného oleje a jejich závislost na teplotě. Pro porovnání vyjdeme ze zjednodušeného modelu, který předpokládá, že teplota paliva při provozu na naftu odpovídá 35 °C, zatímco pro olej platí díky předeřevu teplota vyšší, a sice 70 až 80 °C.



Odpovídající hustoty jsou potom 830 kg/m^3 pro naftu a 870 kg/m^3 pro olej. Z dostupných hodnot tedy určíme objemovou výhřevnost dle vztahu

$$\text{objemová výhřevnost} \left[\frac{\text{MJ}}{\text{dm}^3} \right] = \text{hmotnostní výhřevnost} \left[\frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \right] * \frac{\text{hustota} [\text{kg/m}^3]}{1000 [\text{dm}^3/\text{m}^3]}. \quad (17)$$

Pro naftu pak platí objemová výhřevnost $35,28 \text{ MJ/dm}^3$ a pro olej $31,32 \text{ MJ/dm}^3$. Objemová výhřevnost oleje by tedy měla být o cca 11% nižší vůči naftě, zatímco hmotnostní vykazuje rozdíl 13%. Z uvedeného bychom měli očekávat 11%-ní pokles výkonu při provozu na olej.

Žádná z dostupných laboratoří nedisponovala analýzou výhřevnosti paliva, a proto k této problematice bylo přistoupeno experimentálně.

4.10.1 ZPŮSOB MĚŘENÍ

U modelového vozidla (viz. kap. 0) byla dlouhodobě sledována spotřeba paliva. Čím méně energie palivo obsahuje, tím více je ho potřeba spotřebovat k dosažení stejného výkonu. Tento způsob měření samozřejmě může vykazovat značnou chybu, jelikož je ovlivňován hned několika významnými faktory, kterým prakticky nelze předejít. Pokud se však s chybou počítá při interpretaci výsledků, má i tato metoda značnou vypovídací schopnost.

Rozdíl mezi ideálním a skutečným průběhem zkoušky spočívá hlavně v tom, že nelze docílit zcela shodných podmínek měření. To je zejména jízdní cyklus, teplota okolí, teplota motoru, jeho opotřebení atd... Částečně lze však chybu eliminovat délkou zkoušky, tedy čím více kilometrů, tím menší chyba.

Asi nejpodstatnějším faktorem zkreslujícím výsledek je však fakt, že ani zdaleka se veškerá chemická energie obsažená v palivu nepřemění v mechanickou. Tato přeměna je totiž velmi ovlivněna zejména dalšími vlastnostmi paliva, jako je schopnost hoření, rychlost šíření plamene, průtah vznícení atd.

Vzhledem k výše uvedenému lze konstatovat, že získaný výsledek nelze interpretovat jako výhřevnost, tedy množství chemické energie v palivu, ale spíše jako porovnání skutečně využité energie z objemové jednotky jednotlivých paliv k pohonu vozidla. Výsledek lze však i přesto uznat za relevantní, a to z pohledu široké veřejnosti, kterou zajímá spíše rozdíl ve spotřebě než množství chemické energie v palivu.

Jednotlivé zkoušky trvaly po dobu nájezdu cca 10.000 km pro každé palivo. Na začátku a na konci byla nádrž zcela naplněna, aby bylo docíleno stejných podmínek. Při každém tankování byl zaznamenán stav ujetých km s přesností na 1 km a množství paliva s přesností na 0,01 litru.

MĚŘENÍ SPOTŘEBY NAFTY:

Výchozí stav čítače km:	298028
Konečný stav čítače km:	307424
Celkový počet ujetých km:	9396 km
Celkové množství spotřebované nafty:	720,61 litrů

**MĚŘENÍ SPOTŘEBY OLEJE:**

Výchozí stav čítače km:	309496
Konečný stav čítače km:	320074
Celkový počet ujetých km:	10578 km
Celkové množství spotřebované nafty:	777,95 litrů

Spotřeba paliva v litrech/100 km se vypočte dle vztahu

$$\text{spotřeba paliva} \left[\frac{l}{100km} \right] = \frac{\text{spotřebované množství paliva} [l]}{\frac{\text{celkový počet ujetých km} [km]}{100 \left[\frac{km}{100km} \right]}}. \quad (18)$$

4.10.2 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

Dle vztahu (18) vychází spotřeba paliva během zkoušky 7,669 l/100km při provozu na naftu a 7,354 l/100km při provozu na olej, což činí asi 4,1%-ní pokles spotřeby vůči naftě. Bylo by odvážné tvrdit, že odpadní rostlinný olej má vyšší objemovou výhřevnost než nafta. Pokud však přihlídneme k možným chybám, kterými je výsledek zatížen, můžeme výsledné spotřeby prohlásit za přibližně stejné. Z toho lze učinit závěr, že množství využitá energie z objemové jednotky je u obou paliv přibližně stejné.



5 KONVERZE VOZIDLA NA BIVALENTNÍ PALIVOVÝ SYSTÉM

Vzhledem k tomu, že rostlinný olej má rozdílné vlastnosti oproti naftě, pro kterou je motor konstruován, je potřeba jej k pohonu tohoto motoru náležitě upravit, aby nedocházelo ke vzniku nežádoucích jevů. Jedná se zejména o viskozitu, jejíž hodnoty značně převyšují hodnoty pro naftu. Abychom se hodnotami viskozity oleje co nejvíce přiblížili hodnotám, pro které je motor konstruován, je nutno olej ohřívat, a to samozřejmě kontinuálně během provozu. Zde se nabízí několik možností, které lze shrnout do dvou hlavních skupin:

- Ohřev odpadním teplem motoru,
 - Ohřev elektrickou energií,
- případně jejich kombinace.

5.1 OHŘEV ROSTLINNÉHO OLEJE

Obě skupiny nabízí řadu výhod i nevýhod a je úkolem řešitele navrhnout systém, který bude vykazovat co možná nejvyšší efektivitu. Pojďme si tedy představit jednotlivé možnosti:

5.1.1 OHŘEV ODPADNÍM TEPEM MOTORU:

Jak již sám název napovídá, odpadní teplo je teplo, které můžeme využít, aniž by chybělo pro jinou aplikaci. To je velká výhoda, obzvlášť uvědomíme-li si, kolik této energie máme k dispozici: Většina ztrátové energie paliva se přemění právě v toto teplo, a tedy i v případě relativně vysoké účinnosti soudobých vznětových motorů ($\approx 40\%$) máme k dispozici více než polovinu energie dodané palivem ve formě odpadního tepla. Tato možnost se tedy zdá být velmi výhodná, má však jednu nezanedbatelnou nevýhodu, a sice že míra tepla, které máme k dispozici, je úměrná míře ohřátí motoru. S odpadním teplem tedy nemůžeme počítat vůbec bezprostředně po studeném startu a pouze v omezené míře až do dosažení provozní teploty motoru. Obzvlášť pak při nižších okolních teplotách (zimní období, chladnější oblasti) může tato prodleva trvat neprakticky dlouho.

OHŘEV CHLADICÍ KAPALINOU:

Jedná se o výhodné řešení. Realizace pomocí tepelného výměníku „chladicí kapalina – palivo“. Chladicí kapalina má příznivou měrnou tepelnou kapacitu (její velikost závisí na poměru voda:nemrznoucí směs), což umožňuje použití menšího tepelného výměníku. Takový má i menší „setrvačnost“ – rychleji se ohřeje na provozní teplotu.

**VÝHODY:**

- Navýšení množství chladicí kapaliny v chladicím okruhu (a s tím spojená ekonomika provozu) je zanedbatelné
- Poměrně nenáročná úprava
- Dostatečné množství tepla
- Snadná regulovatelnost (je-li motor a jeho příslušenství v dobré kondici, je provozní teplota chladicí kapaliny víceméně konstantní)

NEVÝHODY:

- Může dojít k mírnému snížení výkonu topení
- Požadovaná teplota a dostatečné množství tepla je k dispozici až po ohřátí motoru na provozní teplotu

OHŘEV MAZACÍM OLEJEM:

Toto řešení zmiňuji spíše pro úplnost, jelikož je díky převažujícím nevýhodám v praxi víceméně nepoužitelné. Do mazacího okruhu by byl zapojen tepelný výměník „mazací olej – palivo“.

VÝHODY:

- Odběr přebytečného tepla z mazacího oleje při dlouhodobějším provozu ve vyšším zatížení (u vozidel s absencí olejového chladiče)

NEVÝHODY:

- Nežádoucí ochlazování mazacího oleje při nižším zatížení
- Obtížné napojení výměníku na mazací okruh
- Navýšení množství olejové náplně o objem výměníku a vedení – z hlediska relativně krátkého intervalu mezi výměnami olejové náplně nevhodné řešení

OHŘEV VÝFUKOVÝMI PLYNY:

I tato varianta se nabízí, jelikož výfukovými plyny odchází největší množství odpadního tepla. Realizace by byla možná výměnou tepla mezi pláštěm výfukového potrubí a palivem.

VÝHODY:

- Dostatečné množství tepla, a to již při nízkých teplotách motoru

**NEVÝHODY:**

- Velmi špatná regulovatelnost (teplota výfukových plynů se výrazně mění v závislosti na jízdním režimu)
- Po zastavení motoru, a tedy i dodávky paliva, může vysoká teplota výfukového potrubí způsobit nežádoucí jevy u paliva ve výměníku

5.1.2 OHŘEV ELEKTRICKOU ENERGIÍ:

Oproti odpadnímu teplu má teplo vzniklé přeměnou elektrické energie tu výhodu, že je k dispozici kdykoliv. Nevýhody ovšem jasně převládají. Odběrem elektrické energie z palubní sítě dochází ke zvýšenému zatížení alternátoru, což má za následek pokles účinnosti motoru. Poměrně špatná účinnost alternátoru (cca 65%) tento jev přitom ještě umocňuje. Uvážíme-li také fakt, že množství elektrické energie v palubní síti je limitováno výkonem alternátoru, dospějeme k závěru, že elektrické ohřívače nejsou vhodné k ohřevu většího množství paliva. Tato zařízení lze však kvůli jejich „rychlosti“ s výhodou využít jako podpůrná.

VÝHODY:

- Teplo k dispozici kdykoliv

NEVÝHODY:

- Pokles účinnosti motoru
- K dispozici malé množství tepla

Představili jsme si tedy jednotlivé možnosti ohřevu paliva za provozu. Problém ovšem zůstává s teplotou paliva při studeném startu či krátce po něm. Mohlo by se zdát, že palivo před studeným startem můžeme ohřát elektrickým ohřívačem, jelikož, jak již bylo řečeno, toto teplo je k dispozici kdykoliv. Prakticky toto však není možné: abychom dosáhli požadované teploty paliva ještě před samotným spouštěním motoru, museli bychom elektrickou energii čerpat z akumulátoru, který by byl tímto značně zatěžován. Obzvláště pak v chladnějším období, kdy výchozí teplota paliva může být hluboko pod bodem mrazu, by se mohlo stát, že akumulátor bude vybit či značně oslaben natolik, že nezůstane dostatek energie pro samotné spuštění motoru. Navíc opakovaným vybíjením a nabíjením akumulátoru by značně klesala jeho životnost. Dalším důvodem k vyloučení tohoto způsobu je fakt, že výkony elektrických ohřívačů jsou limitovány množstvím elektrické energie v palubní síti. Nejenže by tedy doba potřebná k ohřátí paliva před startem oddalovala samotný start, který by se tímto stal neúnosně nekomfortním (v dnešní době je řidič zvyklý nanejvýš na prodlevu před startem nutnou pro nažhavení žhavicích svíček), ale především by výkon ohřívače stěží postačoval ke kontinuálnímu ohřevu paliva za provozu.

Studené starty ztěžuje ještě další vlastnost rostlinného oleje, a tou je bod vzplanutí, který je mnohem vyšší než u nafty. Při nižších teplotách okolí se může stát, že i při žhavicích svíčkách v činnosti se nepodaří motor spustit, anebo chytá tzv. „po válcích“. Přitom dochází jak ke zvýšenému opotřebení motoru vlivem nerovnoměrného namáhání, tak především k nárůstu množství emisí nespálených HC. Emise HC mohou ale růst také při běhu na rostlinný olej zastudena (více než u nafty), jelikož dochází k markantnějšímu zhášení plamene v blízkosti studených stěn válců. Nespálené palivo pak opouští válec nejen výfukem, ale také stíráním do



mazacího oleje, který reakcí s rostlinným olejem polymeruje, mění konzistenci na „želatinu“ a jeho vlastnosti mohou výrazně degradovat.

Řešením těchto problémů je úprava palivového systému vozidla na dvounádržový (bivalentní) systém, přičemž jedna nádrž slouží k provozu na naftu a druhá k provozu na rostlinný olej. Studený start motoru a jeho zahřívání probíhá provozem na naftu a v momentě, kdy je k dispozici dostatek tepelné energie k ohřevu rostlinného oleje, dojde k přepnutí přívodu paliva z nafty na olej. Aby byl zajištěn bezproblémový další start studeného motoru, je třeba před jeho vypnutím provést proplach palivového systému naftou. Při přechodech mezi použitými palivy je nutno brát v úvahu, že nespálené palivo se ze vstřikovacího čerpadla vrací zpětným vedením do nádrže. Musíme tedy také zajistit, aby se palivo vracelo do jemu příslušné nádrže, a navíc aby po přepnutí přívodu (potažmo odvodu) paliva nedocházelo k ředění obsahu nádrže palivem druhým, které bylo ještě obsaženo v objemu vstřikovacího čerpadla a palivového vedení. Tohoto lze docílit řízenou prodlevou mezi přepnutím přívodu a odvodu paliva, aby nově přiváděné palivo vytlačilo původní palivo do příslušné nádrže a teprve potom došlo k přepnutí zpětného vedení. Objemové množství je přitom rovno objemu všech částí palivového systému mezi přepínacími ventily na přívodu a odvodu paliva, tedy zejména objem vstřikovacího čerpadla, palivového vedení, případně filtru či ohřívače apod. Je tedy žádoucí, aby byl tento objem co nejmenší, a to zejména kvůli proplachu systému naftou před odstavením motoru. Proplach je tak rychlejší, může trvat kratší dobu a vyžaduje menší množství nafty, jejíž spotřebu se snažíme co nejvíce minimalizovat. K určitému mísení obou paliv však i přesto dojde, a to díky vířivým dějům uvnitř vstřikovacího čerpadla. Prakticky tak zde nedochází k požadovanému vytlačování jednoho paliva druhým, ale spíše k postupnému poklesu koncentrace původního paliva v novém, a to od 100 až do 0%. Aby se tato směs obou paliv nevracela zpět do jedné nebo druhé nádrže, lze ji ve vstřikovacím čerpadle udržet až do úplného spotřebování systémem zpětného vedení nakrátko. Ten spočívá v tom, že zpětné vedení paliva z čerpadla je přivedeno přes odbočku zpět na vstup. Směs paliva tedy cirkuluje z konce čerpadla zpět na začátek a současně je přiváděno právě tolik čerstvého paliva, kolik je ho spotřebováno vstříknutím do spalovacího prostoru motoru.



5.2 REALIZACE KONVERZE VOZIDLA NA BIVALENTNÍ PALIVOVÝ SYSTÉM

Aby mohl být odpadní rostlinný olej vyzkoušen jako palivo v praxi, byla realizována přestavba na dvounádržový systém ve zkušebním vozidle:

BMW E34 525 tds Touring, datum výroby 31.5.1995

Datum přestavby: 11/2011, stav tachometru: 309000 km

Současný stav tachometru (5/2012): 320000 km

Motor:

Typ: BMW M51D25

Zdvihový objem [cm³]: 2497

Počet válců, uspořádání: 6 v řadě

Počet ventilů na válec: 2

Vrtání x zdvih [mm]: 80 x 82,8

Kompresní poměr: 22:1

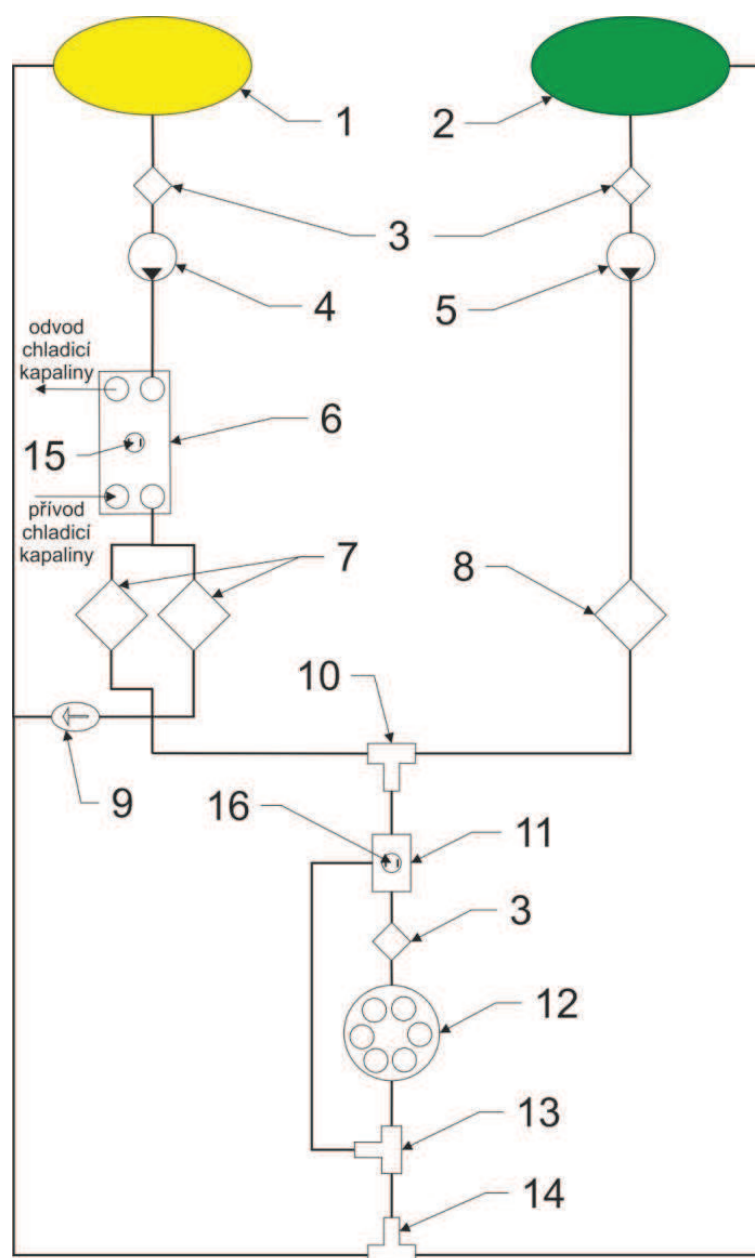
Výkon [kW(PS)/min⁻¹]: 105(143)/4800

Krouticí moment [Nm/min⁻¹]: 260/2200

Příprava směsi: nepřímý vstřík do komůrky, vstříkovací čerpadlo Bosch VP37 (elektronicky řízené mechanické rotační čerpadlo s axiálním pístem), vstříkovací trysky DN0SD300, otevírací tlak 150 bar

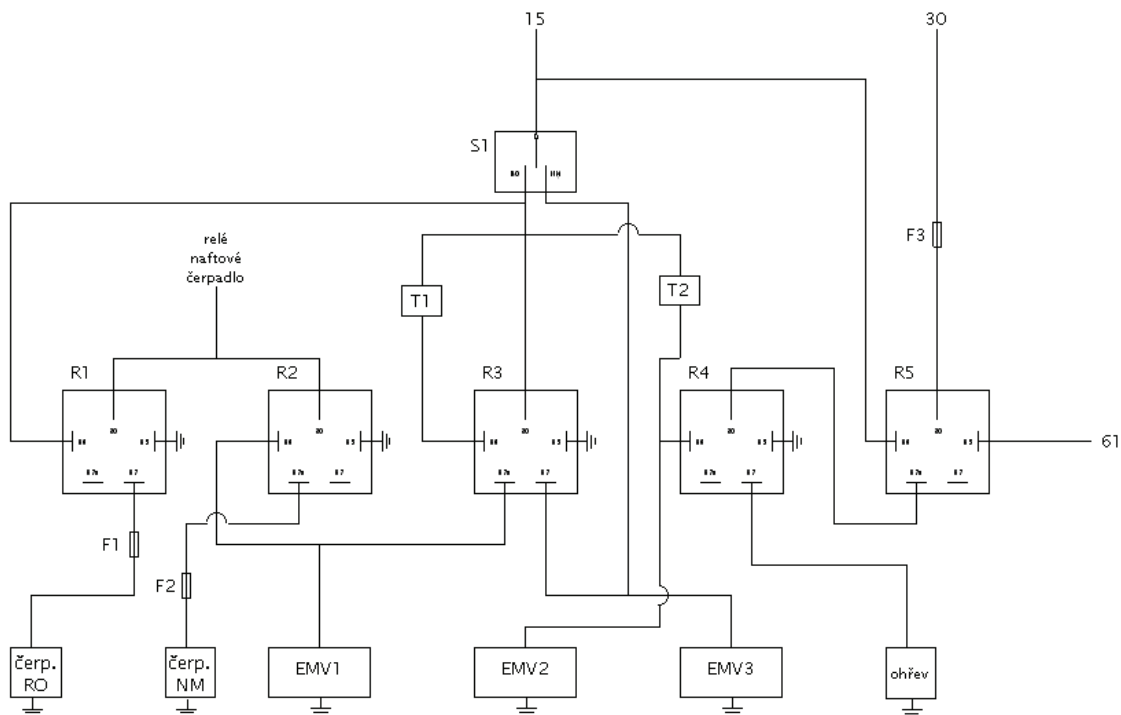
Přeplňování: turbodmychadlo + intercooler, plnicí tlak 1,1 bar

Aby bylo dosaženo co nejvyšší úspory motorové nafty a zároveň maximálního komfortu řidiče při obsluze zařízení, byl systém navržen tak, aby automaticky přepínal použité palivo v závislosti na dosažené teplotě. Zůstává však potřeba manuálního propláchnutí soustavy naftou před odstavením motoru. Systém je také doplněn zařízením, které zabraňuje ředění nafty v nádrži rostlinným olejem. Ohřev paliva zajišťuje tepelný výměník a elektrický průtokový ohřívač. V tepelném výměníku se směňuje teplo mezi chladicí kapalinou motoru a palivem. Elektrický průtokový ohřívač je v činnosti pouze tehdy, nedosahuje-li teplota výměníku provozní teploty motoru. Slouží tedy k dohřívání paliva během fáze zahřívání motoru na provozní teplotu. To umožňuje přepnutí použitého paliva z nafty na rostlinný olej, což má za následek žádoucí úsporu nafty. Schéma přestavby a zapojení jednotlivých členů je znázorněno na Obr. 18 a elektrická instalace souvisící s přestavbou je vyobrazena na Obr. 19.



Obr. 18 Schéma dvounádržového systému

1 nádrž na RO; 2 nádrž na MN; 3 předřadný palivový filtr; 4 podávací čerpadlo na RO; 5 podávací čerpadlo na MN; 6 tepelný výměník; 7 palivový filtr na RO; 8 palivový filtr na MN; 9 zpětný ventil; 10 třícestný elektromagnetický ventil 1; 11 elektrický průtokový ohříváč; 12 vstřikovací čerpadlo; 13 třícestný elektromagnetický ventil 2; 14 třícestný elektromagnetický ventil 3; 15 bimetalový termostatický rozpínač 1; 16 bimetalový termostatický rozpínač 2



Obr. 19 Schéma elektrické instalace dvounádržového systému

15 svorka 15 (+12V za spínací skříňkou); 30 svorka 30 (+12V z baterie); 61 svorka 61 (výstup z alternátoru na kontrolku dobíjení); S1 třípolohový přepínač s klidovou polohou uprostřed; T1, T2 bimetalový termostatický rozpínač 1 a 2; R1-R5 přepínací relé 1-5; F1, F2 pojistka (3A); F3 pojistka (30A); EMV1-EMV3 třícestný elektromagnetický ventil 1-3; „čerp. RO“ podávací čerpadlo na RO; „čerp. NM“ podávací čerpadlo na MN; „ohřev“ elektrický průtokový ohříváč; „relé naftové čerpadlo“ přívod +12V k původnímu (sériovému) podávacímu čerpadlu

Jednotlivé komponenty byly voleny následovně:

NÁDRŽ NA ROSTLINNÝ OLEJ:

Jako palivová nádrž na rostlinný olej byla použita sériová nádrž vozidla, která svým objemem 80 litrů zajišťuje dostatečný dojezd a nabízí komfort palubního ukazatele stavu paliva či pohodlné tankování. Z nádrže bylo demontováno sériové podávací čerpadlo, které není schopno čerpat vysoce viskózní olej. Došlo k úpravě hadicových vývodů pro hadice s větší světlostí z 8 na 12 mm.

NÁDRŽ NA MOTOROVOU NAFTU:

Jelikož spotřeba nafty je výrazně nižší než spotřeba oleje, bylo vozidlo vybaveno druhou, menší nádrží na naftu. Aby nedošlo ke zmenšení vnitřního prostoru, je nádrž vestavěna v prostoru pro rezervní kolo, které již dnešní legislativa umožňuje v autě nevozit. Nafta se tankuje přímo do nádrže, tedy zavazadlovým prostorem, což není pohodlné, tuto situaci ovšem kompenzuje malá četnost tankování. Nádrž není vybavena snímačem hladiny paliva, a je tedy nutné stav průběžně kontrolovat.

**PALIVOVÉ VEDENÍ NA RO:**

Kvůli vysoké viskozitě, a to zejména při nízkých teplotách okolí, byly veškeré komponenty vedoucí RO propojeny palivovými hadicemi s vysokou světlostí 12 mm (oproti palivovému vedení pro naftu se světlostí 8 mm). Hadice vedoucí pod podlahou, tedy od nádrže k motoru a zpět, byly navíc opatřeny tepelnou izolací pomocí trubíc z pěnového polyetylenu Mirelon, aby nedocházelo k přílišnému ochlazování paliva, které je jednak přiváděno v ohřátém stavu od motoru zpět do nádrže, stejně jako z již přehřáté nádrže k motoru.

PALIVOVÉ VEDENÍ NA MN:

Naftové vedení zůstalo zachováno, pouze bylo připojeno palivovými hadicemi se světlostí 8 mm k přídatné nádrži namísto hlavní.

PODÁVACÍ ČERPADLA:

K distribuci obou paliv z nádrží k motoru byla použita shodná nízkotlaká podávací membránová čerpadla Facet Posi-Flo 60107. Výrobce uvádí použití pro širokou škálu paliv, včetně čerpání vysoce viskózních kapalin. Udávaný průtok paliva je 151 litrů za hodinu při přetlaku v rozmezí 48 až 69 kPa [5]. Parametry sériového čerpadla jsou 100 litrů za hodinu při 50 kPa. Aby byly dodrženy záruční podmínky výrobce, byla obě čerpadla vybavena předřadnými palivovými filtry se schopností filtrace 74 μm .



Obr. 20 Podávací čerpadlo Facet Posi-Flo 60107[5]

TEPELNÝ VÝMĚNÍK:

Úlohou tepelného výměníku je převádět teplo z chladicí kapaliny do paliva, čímž je toto ohříváno a klesá jeho viskozita. Tepelné výměníky jsou charakterizovány výkonem, tedy schopností předat určité množství tepla v čase. Pro návrh tepelného výměníku byly zvoleny tyto vstupní parametry:



$$\begin{aligned}t_{in} &= -20\text{ }^{\circ}\text{C}, \\t_{out} &= 70\text{ }^{\circ}\text{C}, \\V &= 150\text{ l/hod}, \\\rho &= 930\text{ kg/m}^3, \\c &= 1650\text{ J/kgK},\end{aligned}$$

kde t_{in} je teplota paliva vstupujícího do výměníku, t_{out} je požadovaná teplota paliva na výstupu z výměníku, V je objemový průtok paliva výměníkem, ρ je hustota paliva a c jeho měrná tepelná kapacita. Z uvedeného je zřejmé, že požadovaný výkon výměníku má být minimálně takový, aby byl schopen ohřát palivo o velmi nízké teplotě $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ na teplotu $70\text{ }^{\circ}\text{C}$, a to při průtoku rovnajícím se průtoku podávacího čerpadla. Přitom se předpokládá, že hodnoty průtoku a měrné tepelné kapacity chladicí kapaliny jsou dostatečně vysoké k udržení konstantní teploty výměníku, přičemž ta odpovídá provozní teplotě motoru ($80\text{ }^{\circ}\text{C}$). Požadovaný výkon získáme z rovnic:

$$\dot{m} = \rho * V = 930 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 150 \frac{\text{l}}{\text{hod}} = 0,03875 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (19)$$

$$\begin{aligned}P = \dot{Q} &= \dot{m} * c * (t_{out} - t_{in}) = \\&= 0,03875 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * 1650 \frac{\text{J}}{\text{kg}^{\circ}\text{C}} * (70 - (-20))^{\circ}\text{C} = 5754,375 \frac{\text{J}}{\text{s}} \doteq 5,75\text{ kW}\end{aligned} \quad (20)$$

Vozidlo bylo vybaveno 20-ti deskovým tepelným výměníkem, u něhož distributor na dotaz uvedl výkon 14 kW. Výměník je tedy předimenzovaný, při jeho výběru ovšem hrála roli cenová nabídka dodavatele. Při takto vysokém výkonu není problém ohřát palivo na teplotu chladicí kapaliny.

PALIVOVÝ FILTR NA MN:

K filtraci nafty byl zachován původní palivový filtr.

PALIVOVÝ FILTR NA RO:

Jak je zřejmé ze schématu, filtrace rostlinného oleje je zajištěna dvěma paralelně zapojenými palivovými čističi. Toto řešení přináší dva pozitivní dopady na zvýšení spolehlivosti systému: Zaprvé prodlužuje kapacitu, a tím i interval výměny filtru, na dvojnásobek. Toho lze dosáhnout rovněž použitím filtru s dvojnásobnou kapacitou, toto řešení je ovšem neekonomické, jelikož ceny filtrů nerostou úměrně s jejich kapacitou. Dva malé filtry tedy stojí méně než jeden velký. Druhým pozitivním dopadem je skutečnost, že každým z filtrů protéká poloviční množství paliva dodávaného podávacím čerpadlem. To snižuje riziko poškození filtrační vložky, jež by mohlo způsobit protékající palivo o vysoké viskozitě, které rostlinný olej při nižších teplotách dosahuje.

Konkrétně byly použity filtry Müller Filter FN107. Ty jsou výrobcem určeny pro vozidla se čtyřválcovými vznětovými atmosférickými i přeplňovanými motory s přímým vstřikem nafty z koncernu VW, které jsou na českém trhu hojně zastoupeny. To se odráží ve velmi příznivé



ceně i dostupnosti těchto filtrů. Schopnost filtrace je dostačující, jelikož zkušební vozidlo disponuje obdobným systémem vstřikování paliva jako zmíněné koncernové motory, a nároky na čistotu paliva jsou tak stejné. Filtry jsou navíc vybaveny odkalovacími ventily, které umožňují pravidelné odvodnění.

TŘÍCESTNÉ ELEKTROMAGNETICKÉ VENTILY:

V systému jsou použity celkem tři ventily. Dva slouží k přepínání přívodu paliva a jeho vracení zpět do příslušné nádrže zpětným vedením. Třetí ventil zajišťuje aktivaci systému zpětného vedení nakrátko, který byl již představen a jehož význam a princip je popsán v textu níže.

Byly použity ventily Peveko EVPT 5013.32. Tyto ventily jsou navrženy a certifikovány pro přestavbu vozidel k pohonu rostlinným olejem. Dodavatel uvádí certifikáty DEKRA-ITS ISO 9001:2000 a TGA-DAR Stuttgart. Ventily disponují dostatečnou průtočností i při vysoké viskozitě, širokým rozsahem pracovních teplot (-28 až 130 °C) a zaručenou funkčností do přetlaku 3 bar [6].



*Obr. 21 Třícestný
elektromagnetický ventil
Peveko EVPT 5013.32*

**ELEKTRICKÝ PRŮTOKOVÝ OHŘÍVAČ:**

Ohřívač je vyroben z mosazné tvarovky, do které je jako topné těleso instalována žhavicí svíčka Beru GV719. Pod napětím $U = 12\text{ V}$ byl naměřen protékající proud $I = 17\text{ A}$, a tedy topný výkon P je roven

$$P = U * I = 12V * 17A = 204W. \quad (21)$$

Ve srovnání s výkonem tepelného výměníku je tato hodnota nízká, ohřívač je ovšem integrován do smyčky zpětného vedení nakrátko, díky čemuž je výkon postačující, jelikož nespotřebované ohřáté palivo neodtéká do nádrže, nýbrž se ze vstřikovacího čerpadla vrací zpět do ohřívače. Vzhledem k možnosti vzniku usazenin na topném tělese a jejich následného uvolnění je mezi ohřívač a vstřikovací čerpadlo umístěn malý palivový filtr.

BIMETALOVÉ TERMOSTATICKÉ ROZPÍNAČE:

Okamžik přepnutí paliva z nafty na rostlinný olej ovládá bimetalový termostat, který je umístěn na tepelném výměníku (na Obr. 18 pozice č. 15). Pro tento účel byl použit termostat s nastavitelnou teplotou v rozsahu 20 až 90 °C, který při dosažení požadované teploty rozpojí elektrický obvod, v němž je zapojen. Nastavitelný termostat byl zvolen proto, aby mohla být teplota přepnutí paliva experimentálně naladěna na optimální hodnotu. Praxe ukázala, že v kombinaci se zpětným vedením nakrátko s integrovaným elektrickým průtokovým ohřívačem může být teplota přepnutí paliva nastavena již na hodnotu kolem 50 °C, což je příznivé vzhledem ke spotřebě nafty.

Druhý termostat (Obr. 18 pozice č. 16) ovládá aktivaci zpětného vedení nakrátko a elektrického ohřevu. V tomto případě se již jedná o bimetalový termostat s fixní teplotou rozpojení obvodu 70 °C. Nedosahuje-li palivo ve smyčce kolem vstřikovacího čerpadla této teploty, je smyčka uzavřena a ohřev aktivní. Tím je dosaženo růstu teploty paliva za výměníkem. V momentě, kdy teplota paliva přitékajícího z výměníku dosáhne hodnoty 70 °C, termostat rozpojí obvod, čímž se deaktivuje elektrický ohřev i systém zpětného vedení nakrátko a nespotřebované palivo odtéká ze vstřikovacího čerpadla zpět do nádrže.

5.3 REŽIMY DVOUNÁDRŽOVÉHO PALIVOVÉHO SYSTÉMU

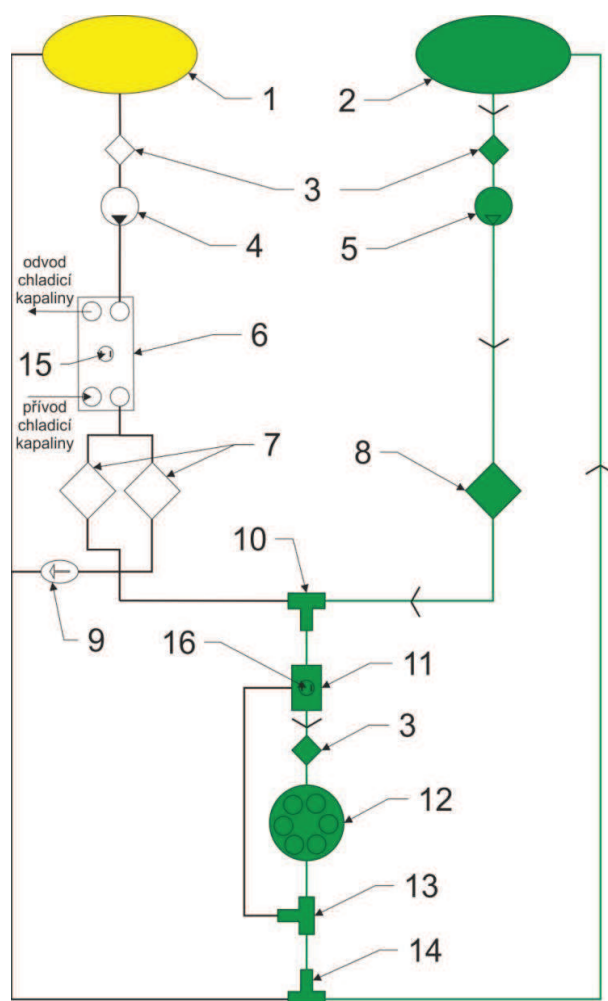
Z uvedeného je zřejmé, že dvounádržový palivový systém pracuje v několika režimech. Každý režim je dále představen příslušným schématem a popisem činnosti. Číslovaným pozicím na schématech odpovídá legenda u Obr. 18. Paliva jsou na schématech barevně odlišena, přičemž motorová nafta je symbolizována zeleně a rostlinný olej žlutě. Znázorněné šipky značí vždy směr toku paliva a jejich barva teplotu paliva: černá = teplota není v daném režimu ovlivňována, modrá = neohříváné palivo, oranžová = palivo ohřáté na teplotu do 70 °C, červená = palivo ohřáté na teplotu nad 70 °C. Čísla v závorce za názvy komponentů odpovídají pozici ve schématu.



5.3.1 REŽIM „NAFTA“:

Vozidlo musí umožňovat provoz jak na rostlinný olej, tak na naftu. Tento režim je aktivován přepnutím přepínače S1 (Obr. 19) do polohy „MN“. Režim odpovídá palivovému systému vozidla bez přestavby.

Nafta je z nádrže (2) dopravována podávacím čerpadlem (5) k třicestnému elektromagnetickému ventilu 1 (10, dále jen EMV1), který není napájen. Z něj pokračuje přes elektrický průtokový ohřívač (11, dále jen ohřívač), který není v činnosti, do vstřikovacího čerpadla. Nespotřebované palivo pokračuje do elektromagnetického třicestného ventilu 2 (13, dále jen EMV2), který není napájen, a dále do elektromagnetického třicestného ventilu 3 (14, dále jen EMV3), který je napájen, čímž je zpětné vedení přepnuto do nádrže s naftou.



Obr. 22 Funkční schéma přestavby: režim „nafta“

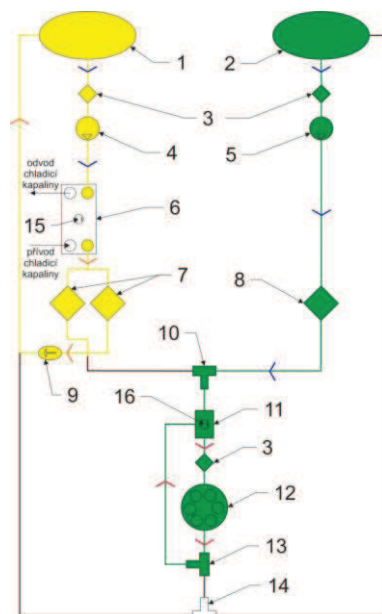


5.3.2 REŽIM „OLEJ DO 50 °C“ – FÁZE 1:

Jízda na olej je podmíněna dosažením dostatečné teploty oleje. Než je této teploty dosaženo, je motor poháněn naftou. Mezi tepelným výměníkem (6, dále jen výměník), který slouží k ohřevu oleje, a EMV1 (10), který přepíná přívod paliva, je ovšem značné množství oleje, zejména díky přítomnosti palivových filtrů (7). Tento objem oleje by byl bezprostředně po přepnutí přívodu paliva vtlačen do vstřikovacího čerpadla (12) v neohřátém stavu, což je nežádoucí. Průtok oleje na přívodu z nádrže by navíc mohl být značně snížen právě přítomností filtrů, jejichž průtokový odpor roste s viskozitou. Systém je tedy navržen tak, aby jeho co největší část mezi výměníkem a vstřikovacím čerpadlem byla předehřáta ještě před přepnutím přívodu paliva.

Tento režim je aktivován přepnutím přepínače S1 (Obr. 19) do polohy „RO“, pokud není na výměníku dosaženo teploty nastavené na bimetalovém termostatu 1 (15, dále jen T1), tedy při zahřívání motoru. Motor je poháněn naftou. Ta je z nádrže (2) ke vstřikovacímu čerpadlu (12) dopravována stejně jako v režimu „nafta“, ale ohříváč (11) je nyní v činnosti. EMV2 (13) je napájen, čímž je aktivováno zpětné vedení nakrátko a nespotřebované palivo se ze vstřikovacího čerpadla (12) vrací zpět do ohříváče (11). Z nádrže tedy přitéká pouze tolik paliva, kolik je vstřikováno do motoru. Kombinace zapnutého ohříváče a přívodu poměrně malého množství studeného paliva z nádrže způsobí, že v této části systému roste teplota.

Zároveň je ovšem napájeno podávací čerpadlo (4), které čerpá rostlinný olej z nádrže (1) do výměníku (6), kde se ohřívá na teplotu chladicí kapaliny, a z něj odtéká do filtrů (7), které jsou tímto způsobem předehřívány. Protože EMV1 (10) není napájen, čímž je uzavřen průtok rostlinného oleje, je palivo nuceno odtékat přes zpětný ventil (9) zpětným vedením zpátky do nádrže. To způsobuje ohřívání paliva v nádrži, pokles viskozity a s tím související odlehčení podávacímu čerpadlu (4).

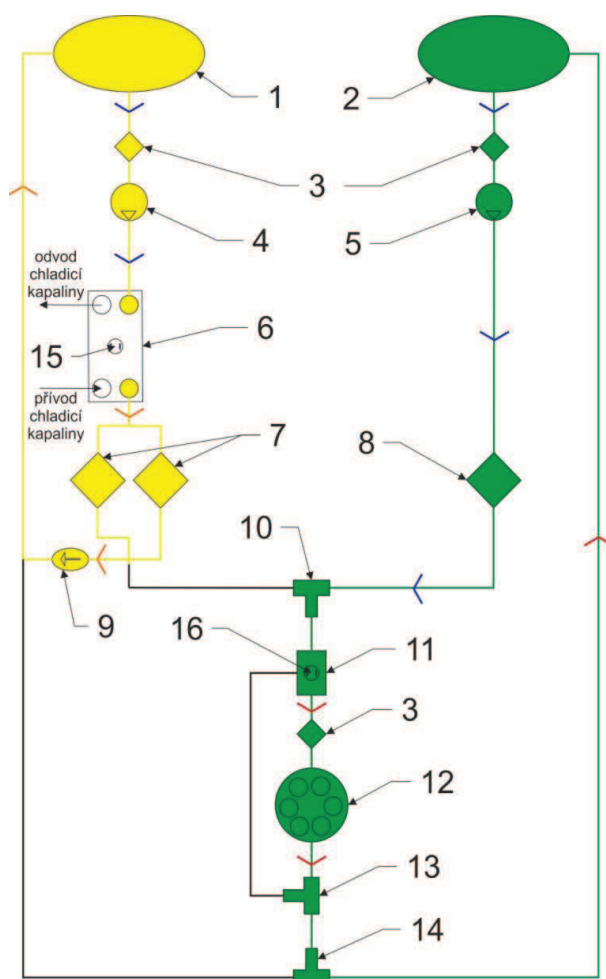


Obr. 23 Funkční schéma
přestavby: režim „olej do 50
°C“, fáze 1



5.3.3 REŽIM „OLEJ DO 50 °C“ – FÁZE 2:

Může se stát, že teplota ve smyčce zpětného vedení nakrátko kolem vstřikovacího čerpadla poroste díky ohřívači rychleji než ve výměníku. To je možné například při jízdě z kopce nebo volnoběžných otáčkách, kdy motor neprodukuje dostatečné množství odpadního tepla, které by ohřívalo chladicí kapalinu, a současně do smyčky s ohřívačem nepřitéká žádné nebo jen malé množství studené nafty, protože spotřeba paliva je v těchto režimech nulová nebo velmi malá. Ohřívačem tak koluje pořád stejná dávka paliva, která se kontinuálně ohřívá. Aby nedošlo ke vzniku nežádoucích jevů spojených s nadměrným ohřevem paliva, je smyčka kolem vstřikovacího čerpadla vybavena bimetalovým termostatem 2 (16, dále jen T2) s fixní teplotou rozepnutí obvodu 70 °C. Při dosažení této teploty ve smyčce je vypnuto napájení ohřívače i EMV2, čímž je zpětné vedení vstřikovacího čerpadla spojeno se zpětným vedením do nádrže, kam palivo následně odtéká. Napájený EMV3 zajišťuje přepnutí zpětné větve do naftové nádrže.

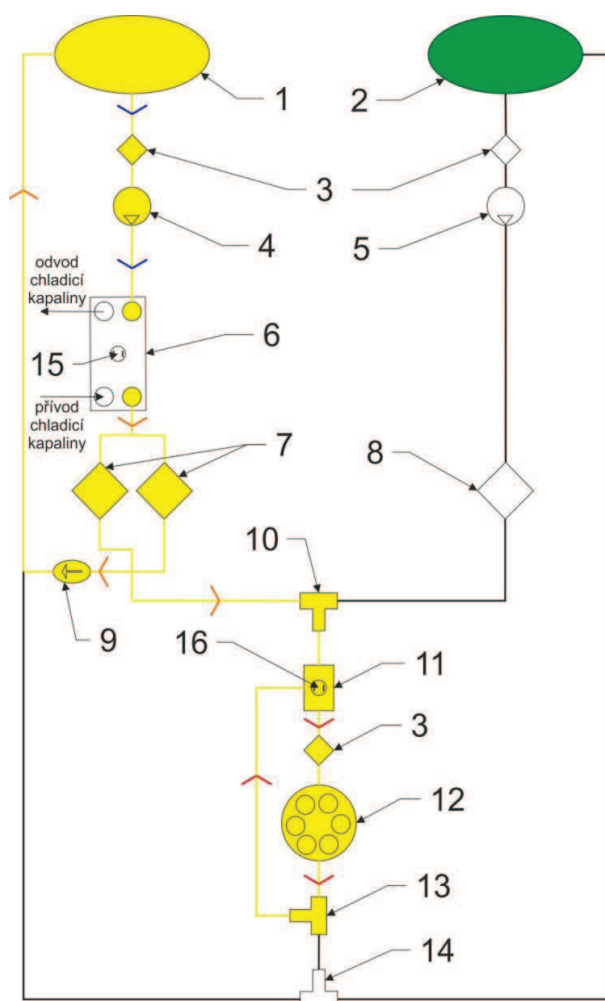


Obr. 24 Funkční schéma přestavby: režim „olej do 50 °C“, fáze 2



5.3.4 REŽIM „OLEJ DO 70 °C“:

Dosáhne-li teplota na výměníku hodnoty nastavené pomocí T1 (15), tedy 50 °C, dochází k přepnutí přívodu paliva z nafty na rostlinný olej. EMV1 (10) je nyní napájen, tím se uzavře přívod nafty a otevře přívod oleje do vstřikovacího čerpadla. Nafta již nemá být kam čerpána, a proto je současně vypnuto podávací čerpadlo (5). Jelikož teplota oleje u T2 (16) nedosahuje 70 °C, je napájen ohříváč (11) a současně uzavřena smyčka kolem vstřikovacího čerpadla (12) napájením EMV2 (13). Do smyčky přitéká jen takové množství paliva, jaké je spotřebováno, což je mnohem méně, než kolik protéká podávacím čerpadlem (4). Přebytečné palivo je proto odváděno zpětným ventilem (9) zpět do nádrže, jejíž obsah je tímto ohříván.

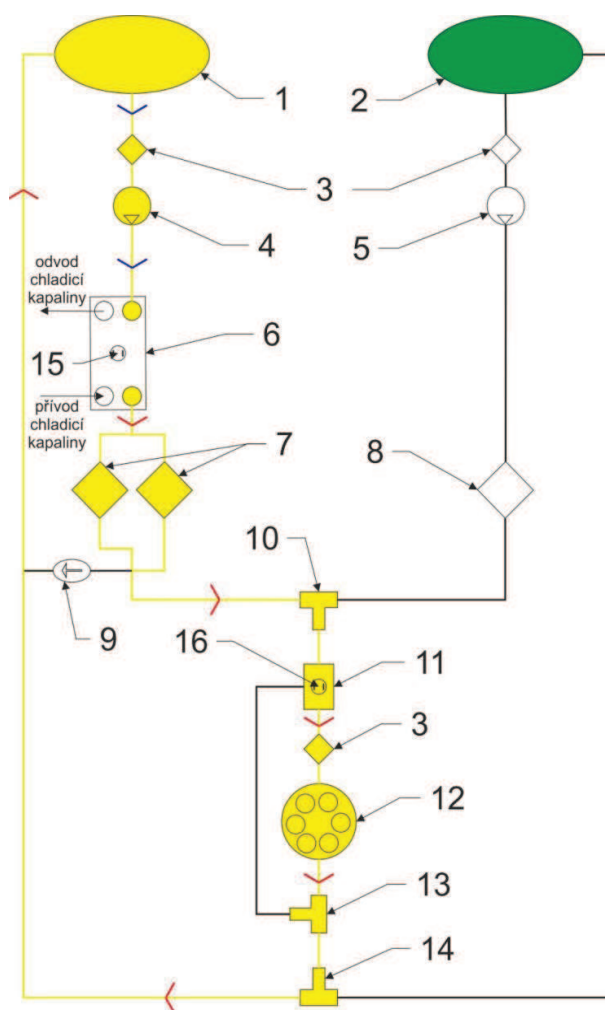


Obr. 25 Funkční schéma přestavby: režim „olej do 70 °C“



5.3.5 REŽIM „OLEJ NAD 70 °C“:

Konečný režim provozu na rostlinný olej spočívá v otevření zpětného vedení paliva do nádrže při dosažení teploty paliva 70 °C. Ať už je této teploty dosaženo pomocí ohřívače (11) nebo výměníku (6), je vypnuto napájení ohřívače (11), EMV2 (13) a EMV3 (14) a ohřáté palivo odtéká do nádrže pro rostlinný olej (1). Zpětný ventil (9) nyní zajistí, že palivo ve zpětném vedení nebude znova nasáto vstřikovacím čerpadlem. Po dosažení provozní teploty motoru systém pracuje právě v tomto režimu, jelikož teplota paliva vystupujícího z výměníku (6) je vyšší než 70 °C, což je žádoucí zejména kvůli úspoře elektrické energie vypnutím ohřívače (11), který má v zapnutém stavu nemalý proudový odběr.

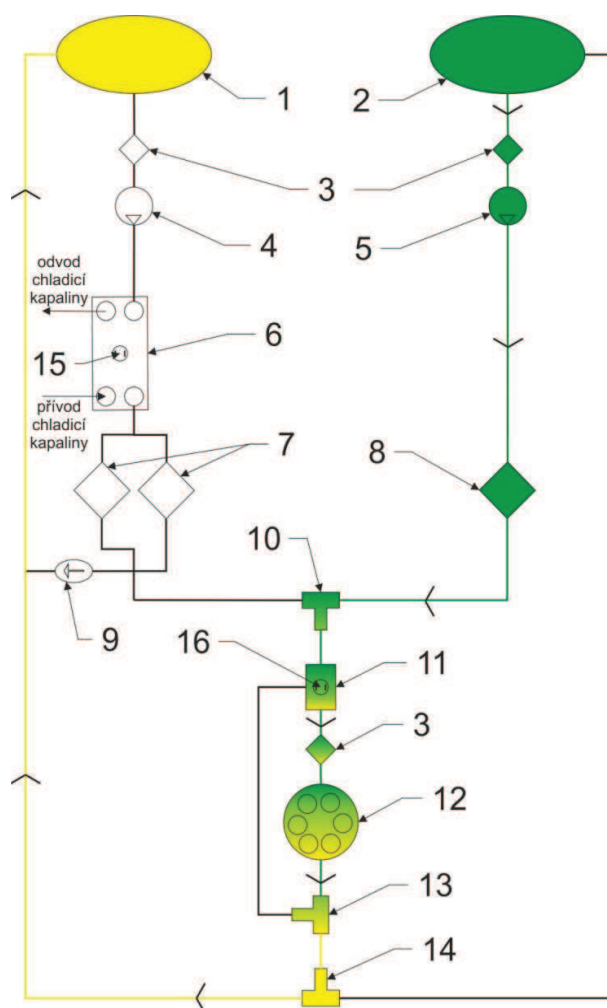


Obr. 26 Funkční schéma přestavby: režim „olej nad 70 °C“



5.3.6 REŽIM „PROPLACH“:

Před odstavením vozidla je nutno systém manuálně propláchnout naftou, aby byl bezpečně zajištěn další start. Tento režim je aktivován přepnutím přepínače S1 (Obr. 19) do klidové polohy uprostřed. Tím je spuštěno naftové podávací čerpadlo (5), zatímco ohřivač (11), EMV1 (10), EMV2 (13) a EMV3 (14) nejsou napájeny. Nafta protéká systémem stejně jako v režimu „nafta“ a v části mezi EMV1 (10) až EMV3 (14) vytlačuje přítomný rostlinný olej do zpětného vedení, které je nyní díky nenapájenému EMV3 (14) přepnuto směrem k nádrži s rostlinným olejem (1). Vzhledem k tomu, že nelze zabránit mísení obou paliv, dochází k částečnému ředění rostlinného oleje v nádrži naftou. Velký vliv má přitom délka trvání proplachu, která závisí na obsluze. Z tohoto důvodu by bylo dobré systém doplnit zařízením, které by obsluze indikovalo, zda je systém již propláchnutý. K tomu by postačil např. snímač teploty paliva za vstřikovacím čerpadlem, jelikož teplota neohříváné nafty je mnohem nižší než teplota oleje.



Obr. 27 Funkční schéma přestavby: režim „proplach“



ZÁVĚR

V úvodu práce byla stručně nastíněna problematika související s palivy vyrobenými z fosilních zdrojů, jejich možná náhrada palivy z obnovitelných zdrojů energie, zejména pak odpadními rostlinnými oleji z potravinářské výroby, a s tím související energetické, ekonomické a ekologické bilance. Z uvedeného je zřejmé, že odpadní oleje mají jasný potenciál částečně nahradit fosilní paliva, a to zejména pro jejich tržní cenu a nenáročnost úpravy.

Dále byly provedeny analýzy vybraných vlastností, které mají rozhodující vliv na použití těchto olejů jako paliva ve spalovacích motorech. Z výsledků je jednoznačné, že vznětový motor nelze provozovat na rostlinný olej bez patřičné úpravy, zejména je nutné zajistit dostatečný ohřev paliva, a to kontinuálně po celou dobu provozu na rostlinný olej. Jako nejvýhodnější se ukazuje ohřev chladicí kapalinou pomocí tepelného výměníku. Dokud není dosaženo podmínek pro bezpečný ohřev oleje, je nutno motor provozovat na motorovou naftu, což vyžaduje konverzi na dvounádržový palivový systém. Princip a návrh takového systému je uveden a podrobně popsán. Takováto úprava vozidla zajistí dosažení nebo přijatelné přiblížení vlastností oleje vlastnostem nafty z hlediska hustoty, viskozity a pěnivosti. Provoz studeného motoru na naftu, především studený start, si vyžaduje také vysoký bod vzplanutí oleje. V rámci analyzovaných vlastností palivo nevyžaduje přídavek aditiv. Buď přídavek aditiva danou vlastnost nezlepšil, nebo se takové aditivum nepodařilo navrhnout (snížení viskozity a vysoké koncentrace fosforu).

Praktická část byla realizována na motoru s dnes již zastaralou koncepcí vstřiku paliva do předkomůrky. Výsledkem této práce tedy není analýza vlivu odpadního rostlinného oleje při aplikaci na novodobé vstřikovací systémy Common rail. Uvedené závěry lze však aplikovat na motory s přímým vstřikem paliva do spalovacího prostoru ve dně pístu, jelikož využívají obdobné vstřikovací systémy.



POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] ČSN EN 590+A1. *Motorová paliva - Motorové nafty - Technické požadavky a metody zkoušení*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [2] ČSN 65 6516. *Motorová paliva - Řepkový olej pro spalovací motory na rostlinné oleje - Technické požadavky a metody zkoušení*. Praha: Český normalizační institut, 2007.
- [3] HLAVENKA, Tomáš. *Využití rostlinných olejů jako alternativních paliv pro motory s vnitřním spalováním*. Brno, 2009. Diplomová práce. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, Agronomická fakulta, Ústav techniky a automobilové dopravy. Vedoucí práce Ing. Martin Fajman, Ph.D.
- [4] KOPECKÝ, Martin. *Pevnostní výpočet čelního soukolí s přímými evolventními symetrickými zuby pomocí MKP*. Brno, 2005. Dostupné z: http://dl.uk.fme.vutbr.cz/zobraz_soubor.php?id=24. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí práce Ing. Martin Vrbka, Ph.D.
- [5] Posi-Flo Fuel Pumps. *Motor Components, LLC* [online]. ©2012 [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: <http://www.facet-purolator.com/posi-flo-pumps.php>
- [6] Elektromagnetický 3/2-cestný ventil. *Energetika&ekologie: pohon motorů na rostlinný olej a E85 (biolih), filtrace a čerpání rostl. olejů* [online]. ©2006 [cit. 2012-05-16]. Dostupné z: <http://www.rostlinnyolej.cz/cs/tricestne-ventily/elektromagneticke-3-2-cestne-ventily-na-rostlinny-olej/elektromagneticky-3-2-cestny-ventil.html>
- [7] *Poly-analyser* [online]. [2010] [cit. 2012-05-18]. Dostupné z: <http://www.poly-analyser.cz/site2/>
- [8] ŠKAPA, Petr. Organizace provozu vozidel: 4. část. In: *Institut dopravy, VŠB-TU Ostrava* [online]. © 2001, 2009 [cit. 2012-05-19]. Dostupné z: <http://www.id.vsb.cz/skapa/>
- [9] Polyaromatické uhlovodíky. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2012-05-23]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Polyaromatické_uhlovodíky
- [10] TOMANIOVÁ, Monika, Vladimír KOCOUREK a Jana HAJŠLOVÁ. Polycyklické aromatické uhlovodíky v potravinách. *Chemické listy*. 1997, roč. 1997, č. 91, s. 357-366. Dostupné z: http://www.chemicke-listy.cz/docs/full/1997_05_357-366.pdf
- [11] LAMBERT, Joseph B. *Organic structural spectroscopy*. Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall, c1998, VIII, 568. ISBN 0-13-258690-8.
- [12] BUCHTA, Jaroslav. Motorové oleje a biopaliva. *Česká asociace petrolejářského průmyslu a obchodu* [online]. c2010 [cit. 2012-05-23]. Dostupné z: <http://old.cappo.cz/veletrh2004/buchta2.html>



- [13] VACULÍK, Martin a Vladimír MATĚJOVSKÝ. Aditiva: naděje na delší a spokojenější život dieselu. *Autodiesel*. 2007, č. 8, s. 116-123. Dostupné z: http://www.autokola.cz/pdf/test_aditiv.pdf
- [14] VOJTÍŠEK, Michal: Jezdíme na rostlinný olej. *Biom.cz* [online]. 2010-11-10 [cit. 2012-05-23]. Dostupné z WWW: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/jezdime-na-rostlinny-olej>>. ISSN: 1801-2655.
- [15] SOUČEK, Jiří. Emise skleníkových plynů a energetická náročnost výroby i použití bionafty. *Technický týdeník*. Praha: SpringerMedia, 2010, roč. 2010, č. 12. ISSN 0040-1064.
- [16] LAURIN, Josef: Rostlinné oleje jako motorová paliva. *Biom.cz* [online]. 2008-10-29 [cit. 2012-05-23]. Dostupné z WWW: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/rostlinne-oleje-jako-motorova-paliva>>. ISSN: 1801-2655.
- [17] HROMÁDKO, Jan: Hodnocení životního cyklu fosilních paliv a bioetanolu. Listy cukrovarnické a řepařské, www.cukr-listy.cz [online], ISSN: 1210-3306
- [18] Energetická bilance při výrobě bionafty. *Preol: člen skupiny agrofert* [online]. c2009 [cit. 2012-05-23]. Dostupné z: <http://www.preol.cz/info-pro-verejnost/energeticka-bilance-bionafty/>
- [19] KIZLINK, Juraj: Biopaliva pro motorová vozidla: produkce, cena, legislativa. *Biom.cz* [online]. 2009-06-22 [cit. 2012-05-23]. Dostupné z WWW: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/biopaliva-pro-motorova-vozidla-produkce-cena-legislativa>>. ISSN: 1801-2655.
- [20] PETR, Jaroslav: Jak ekologická jsou biopaliva?. *Biom.cz* [online]. 2008-11-12 [cit. 2012-05-24]. Dostupné z WWW: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/jak-ekologicka-jsou-biopaliva>>. ISSN: 1801-2655.
- [21] CHHETRI, Arjun B., K. Chris WATTS a M. Rafiqul ISLAM. Waste Cooking Oil as an Alternate Feedstock for Biodiesel Production. *Energies*. 2008, roč. 1, č. 1, s. 3-18. ISSN 1996-1073. DOI: 10.3390/en1010003. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/1996-1073/1/1/3/>
- [22] JELÍNEK, Ladislav, MEDONOS, Tomáš: Energetické, ekonomické a ekologické hodnocení biopaliv. *Biom.cz* [online]. 2011-09-12 [cit. 2012-05-24]. Dostupné z WWW: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/energeticke-ekonomicke-a-ekologicke-hodnoceni-biopaliv>>. ISSN: 1801-2655.
- [23] NETOČNÝ, Ondřej. Uvařte si naftu doma, stačí olej z restaurace. *Aktuálně.cz* [online]. 21.10.2007 [cit. 2012-05-23]. Dostupné z: <http://aktualne.centrum.cz/priroda/clanek.phtml?id=511439>



SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

a	[mm]	délka hlavní poloosy
b	[mm]	délka vedlejší poloosy
c	[J/(kg*K)]	měrná tepelná kapacita
E _{red}	[MPa]	redukovaný modul pružnosti v tahu
F	[N]	přítlačná síla
F ₁	[N]	přítlačná síla 1
F ₂	[N]	přítlačná síla 2
g	[m/s ²]	gravitační zrychlení
I	[A]	proud
m'	[kg/s]	hmotnostní tok
m ₁	[kg]	hmotnost závaží 1
m ₂	[kg]	hmotnost závaží 2
p	[MPa]	kontaktní tlak
P	[W, kW]	výkon
p ₀	[MPa]	iniciační tlak
R ₁	[mm]	poloměr 1
R ₂	[mm]	poloměr 2
R _e	[mm]	ekvivalentní poloměr
S	[mm ²]	plocha
t	[°C]	teplota
t _{in}	[°C]	vstupní teplota
t _{out}	[°C]	výstupní teplota
U	[V]	napětí
V	[l/hod]	objemový tok
η	[mPa*s]	dynamická viskozita
μ	[-]	Poissonovo číslo
ν	[mm ² /s]	kinematická viskozita
ρ	[kg/m ³]	hustota
ρ _n	[kg/m ³]	hustota nafty
ρ _{RO}	[kg/m ³]	hustota rostlinného oleje